

# **INDICE**

## **INTRODUZIONE**

### **1 PRINCIPI DEL COMPORTAMENTO IN CAMPO PLASTICO**

- 1.1 Sviluppo del comportamento elasto – plastico in una generica sezione
- 1.2 Comportamento in campo plastico di una sezione RHS
- 1.3 Capacità rotazionale di un profilo RHS

### **2 TENSIONI RESIDUE**

- 2.1 Generalità
- 2.2 Classificazione delle tensioni residue
- 2.3 Sforzi residui dovuti alla laminazione a freddo

### **3 SNELLEZZA E INSTABILITA'**

- 3.1 Generalità
- 3.2 Instabilità elastica di un piatto rettangolare
- 3.3 Definizione di snellezza e limiti

### **4 RIFERIMENTI NORMATIVI**

- 4.1 Metodi di analisi e classificazione delle sezioni
- 4.2 Confronto tra normative

### **5 CAMPAGNA SPERIMENTALE**

- 5.1 Generalità
- 5.2 Programma delle prove sperimentali
- 5.3 Misurazione dei profili
- 5.4 Descrizione delle prove
  - 5.4.1 Definizione preliminare della prova
  - 5.4.2 Modalità d esecuzione della prova
  - 5.4.3 Metodo per il calcolo delle rotazioni
- 5.5 Schede riassuntive dei test

## **6 CAPACITA' ROTAZIONALE**

### **6.1 Generalità**

### **6.2 Risultati della precedente fase di sperimentazione**

### **6.3 Risultati dell'attuale fase di sperimentazione**

## **7 ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI**

### **7.1 Generalità**

### **7.2 Scelta dei modelli**

### **7.3 Sintesi del procedimento di modellazione**

### **7.4 Modellazione di un profilo RHS**

#### **7.4.1 Realizzazione della geometria**

#### **7.4.2 Proprietà dei materiali**

#### **7.4.3 Definizione delle caratteristiche degli elementi**

#### **7.4.4 Pianificazione della Mesh**

#### **7.4.5 Definizione dei vincoli**

#### **7.4.6 Inserimento dei carichi**

#### **7.4.7 Inserimento delle curve tensione – deformazione**

#### **7.4.8 Analisi non lineare**

#### **7.4.9 Risultati**

## **8 CONCLUSIONI**

## **BIBLIOGRAFIA**

## **INTRODUZIONE**

Lo sviluppo di nuove tecnologie costruttive è un ambito di ricerca che va assumendo sempre maggiore importanza nel settore dell'Ingegneria Civile. Negli ultimi anni, particolare attenzione è stata dedicata alle sezioni strutturali cave, comunemente indicate con la sigla HSS (Hollow Structural Section).

Questa tipologia è particolarmente apprezzata in quanto associa buone caratteristiche meccaniche, le quali garantiscono ottime prestazioni in termini di resistenza e rigidità, a qualità funzionali ed estetiche di ottimo livello. In passato però, a causa dell'elevato costo di produzione, l'interesse per il loro utilizzo è stato rivolto essenzialmente ad opere di una certa importanza.

Le sezioni strutturali cave, sebbene abbiano maggiori costi di fabbricazione, sono contraddistinte da una serie di caratteristiche positive che permettono loro di essere competitive rispetto ai tradizionali profilati a caldo a sezione aperta. Tra queste, quelle più rilevanti sono l'elevata rigidità a torsione, che consente di limitare la necessità di controventamenti laterali, e la minore estensione, per unità di lunghezza, della loro superficie esterna, ciò comporta sia un miglioramento prestazionale nei confronti della resistenza al fuoco, sia una riduzione delle spese di verniciatura.

Oltre all'aspetto economico, un'altra ragione che ha limitato e talvolta ostacolato la loro diffusione è la scarsa conoscenza del comportamento strutturale di questo tipo di profili in prossimità del collasso; nella moderna progettazione delle strutture metalliche, infatti, riveste un ruolo importante la corretta comprensione del comportamento delle sezioni strutturali al di là del tradizionale limite elastico, così da poter sfruttare nel miglior modo possibile, attraverso l'analisi plastica, le riserve del materiale, traendone quindi consistenti benefici anche a livello economico.

Uno tra i requisiti più importanti per una corretta analisi in campo plastico è la richiesta che la sezione trasversale possieda un certo grado di duttilità e, conseguentemente sia caratterizzata da un'elevata capacità di rotazione.

Per quanto concerne le sezioni tubolari, la mancanza di conoscenze del loro comportamento post – elastico e la constatazione che talvolta tali profili non sono in grado di soddisfare ai requisiti di duttilità richiesti, hanno fatto sì che alcune normative ne limitassero l'impiego, o addirittura impedissero, nel caso di utilizzo di analisi plastiche.

A tale riguardo, le Università di Navarra (Spagna), Karlsruhe (Germania) e Lappeenranta (Finlandia), unitamente al Dipartimento di Ingegneria Strutturale dell'Università di Pisa hanno condotto una ricerca, finanziata dalla Comunità Economica Europea e coordinata dal VVT (Building and Transport, Finlandia), con lo scopo di ampliare le conoscenze teoriche e sperimentali del comportamento meccanico post elastico dei profili cavi a sezione quadrata e rettangolare, convenzionalmente indicati con le sigle SHS (Square Hollow Section) e RHS (Rectangular Hollow Section).

La presente Tesi si inserisce nell'ambito di tale ricerca e, partendo da un'analisi critica dello stato dell'arte, si prefigge di individuare i limiti di applicabilità dell'analisi plastica alle strutture realizzate con sezioni rettangolari cave formate a freddo CFRHS (Cold Formed Rectangular Hollow Section).

Nella prima parte, essa illustra la teoria e le procedure di calcolo da eseguire nel caso si vogliano sfruttare tali profili in campo plastico, l'aspetto l'influenza che il procedimento di produzione ha sulle proprietà meccaniche del materiale ed includendo i riferimenti normativi.

Nella seconda parte, invece, sono ampiamente descritte le modalità di esecuzione delle prove di flessione e l'attrezzatura utilizzata durante le esperienze in laboratorio. Sono inoltre riportate le elaborazioni dei dati ed i conseguenti risultati ottenuti in termini di diagrammi momento – rotazione.

Successivamente, con lo scopo di integrare i risultati ottenuti dalla campagna sperimentale, sono presentati i risultati ottenuti da otto modelli agli elementi finiti, aventi lo scopo di simulare il comportamento di altrettanti profilati aventi caratteristiche diverse da quelli testati, sottoposti alla medesima prova di flessione.

A conclusione del lavoro sono discusse le conclusioni emerse al termine del presente lavoro di ricerca. Tra queste, di particolare interesse vi è l'influenza delle snellezze degli elementi piani che costituiscono le pareti dei profilati CFRHS sulla capacità rotazionale degli stessi e, quindi, sulla loro possibilità di impiego nella progettazione plastica.

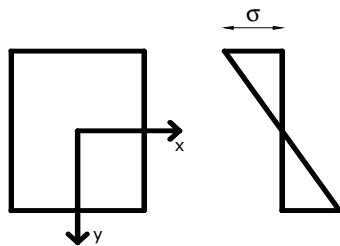
# 1- PRINCIPI DEL COMPORTAMENTO IN CAMPO PLASTICO

## 1.1 Sviluppo del comportamento elasto-plastico in una generica sezione

Al fine di sfruttare al meglio le capacità del material, e l'odierna progettazione delle strutture metalliche impone una conoscenza del comportamento delle sezioni strutturali al di là del limite elastico, ovvero in campo plastico.

In merito a questo, il comportamento di una generica sezione in acciaio quando viene sottoposta a flessione può essere schematizzato dalla successione delle seguenti fasi.

Nella prima, cioè in quella elastica, la tensione normale varia linearmente lungo l'asse di flessione  $y$ , fig. 1.1, ed il suo valore è dato dalla formula di Navier, sotto riportata, nella quale con l'asse  $x$  si fa riferimento all'asse neutro.



$$(1.1) \quad \sigma_x = \frac{M_x y}{J_x}$$

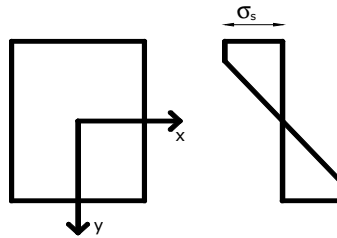
**Fig. 1.1** Andamento delle tensioni in fase elastica

La fase elastica termina quando nel punto più lontano dall'asse neutro si raggiunge la tensione di snervamento  $\sigma_s$ . Il momento flettente in corrispondenza del quale la sezione si trova in uno stato di incipiente plasticizzazione vale pertanto:

$$(1.2) \quad M_y = \sigma_s W_e$$

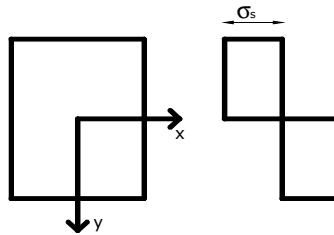
dove con  $W_e$  si è indicato il modulo di resistenza elastico della sezione.

Per quanto riguarda la deformazione, al termine di questa fase il suo valore agli estremi della sezione è  $\varepsilon = \varepsilon_s$ . Aumentando il valore del momento si dà inizio ad una seconda fase. Sotto l'ipotesi che la sezione continui a ruotare mantenendosi piana, la deformazione in due porzioni finite contigue ai lembi assume un valore  $\varepsilon > \varepsilon_s$ ; su queste porzioni però, data la natura del legame costitutivo, il valore della tensione non può oltrepassare quello dello snervamento, fig. 1.2; la sezione si trova quindi in fase elasto-plastica.



**Fig. 1.2** Andamento delle tensioni in fase elasto-plastica

Infine, incrementando ulteriormente il momento flettente e mantenendo ancora l'ipotesi di conservazione delle sezioni piane e di materiale elastico-perfettamente plastico, si giunge ad una situazione in cui le deformazioni risultano ovunque maggiori di  $\epsilon'_s$ , ad eccezione di una striscia infinitesima in corrispondenza dell'asse neutro e, conseguentemente, le tensioni raggiungono una distribuzione uniforme di valore pari a  $\sigma_s$ . La terza fase è detta plastica, fig. 1.3.



**Fig. 1.3** Andamento delle tensioni in fase plastica

Il momento flettente in corrispondenza del quale la sezione si è totalmente plasticizzata vale:

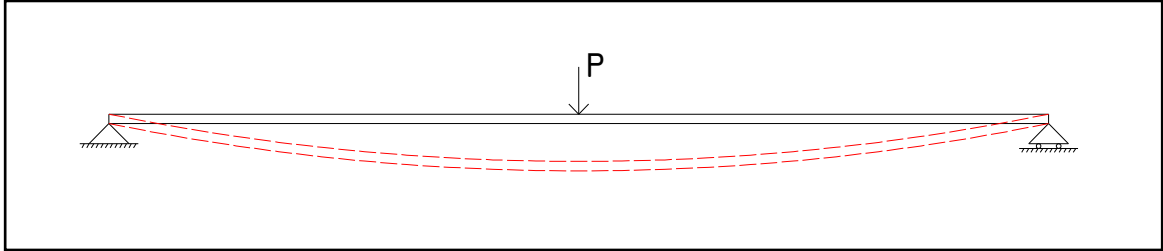
$$(1.3) \quad M_p = \sigma_s W_p$$

dove con  $W_p$  si è indicato il modulo di resistenza plastico della sezione.

Il valore espresso dalla formula ( 1.3 ) è anche il massimo momento al quale la sezione può far fronte se, infatti, volessimo applicare un momento flettente superiore a tale soglia, la sezione non sarebbe in grado di opporsi alla quota  $M - M_p$  e, quindi, ruoterebbe indefinitamente.

## 1.2 Comportamento in campo plastico di una sezione RHS

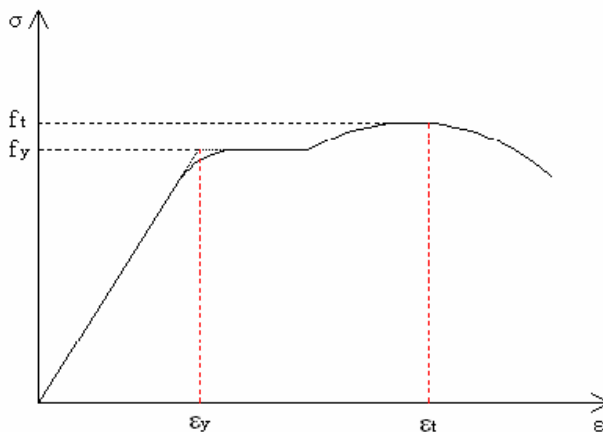
Consideriamo ora un profilo RHS per forma e dimensione simile a quelli utilizzati per la campagna sperimentale, sottoposto ad un carico verticale  $P$ , la sua deformazione, riportata in fig. 1.4, è descrivibile mediante la curvatura  $1/r$ .



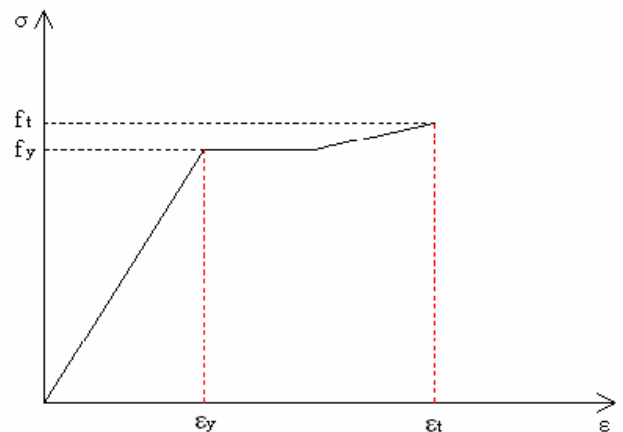
**Fig. 1.4** Trave sotto carico verticale

Se fosse valida la teoria tecnica delle travi, in accordo con l'ipotesi di conservazione delle sezioni piane, la deformazione di ogni fibra longitudinale della trave risulta proporzionale sia alla curvatura sia alla distanza tra la fibra considerata e l'asse neutro di flessione. Questo però è in disaccordo con quanto accade nella realtà, dove l'andamento effettivo delle tensioni all'interno della sezione risulta più complicato a causa della non linearità del legame costitutivo del materiale.

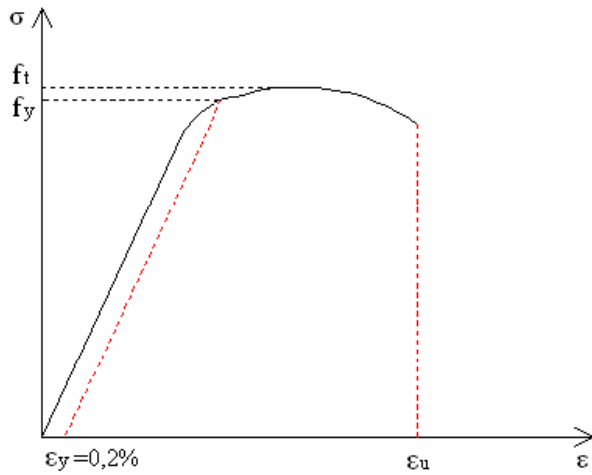
Al fine di rendere più semplice la trattazione, si ipotizza di schematizzare il legame tensione deformazione con un legame elasto-plastico-incrudente, fig. 1.5, caratterizzato da un plateau plastico ben definito, tipico per il caso di RHS formati a caldo, oppure, quando il plateau plastico non esiste e l'incrudimento ha inizio immediatamente dopo lo snervamento, come accade nei profili RHS formati a freddo, con un legame elastico-perfettamente plastico, fig. 1.7.



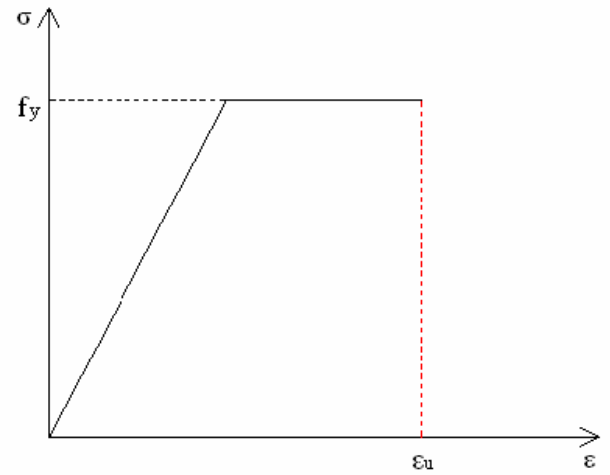
**Fig. 1.5** Legame elasto-plastico-incrudente



**Fig. 1.6** Legame elasto-plastico-incrudente semplificato



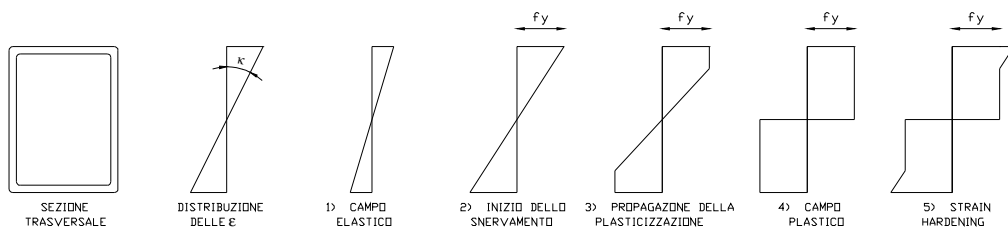
**Fig. 1.7** Legame elasto-plastico



**Fig. 1.8** Legame elastico-perfettamente plastico semplificato

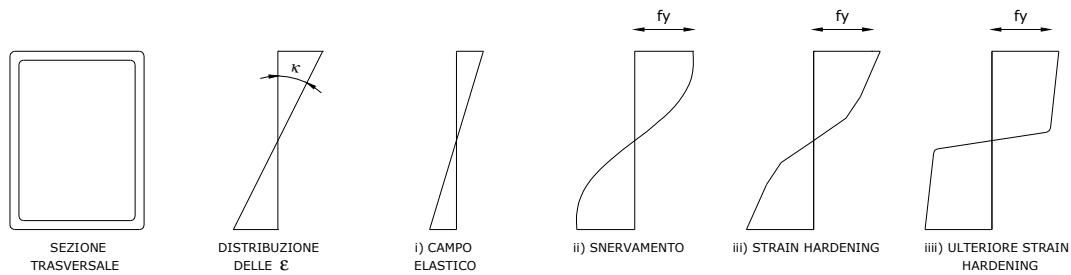
In entrambi i casi si manifesta una prima fase elastica che si protrae fino a quando la sezione presenta uno stato di incipiente plasticizzazione, ovvero, come già stato detto nel precedente paragrafo, quando la fibra più lontana dall'asse neutro raggiunge la tensione di snervamento. Terminata tale fase, all'aumentare della curvatura lo snervamento si estende verso l'interno della sezione stessa.

Una rappresentazione grafica di quanto esposto è riportata nelle figure sottostanti, nelle quali si è riprodotto l'andamento delle tensioni in una sezione di un profilo RHS sia nel caso di legame elasto-plastico-incrudente, fig. 1.9, sia in quello di legame elastico-perfettamente plastico, fig. 1.10.



**Fig. 1.9** Comportamento elasto-plastico-incrudente



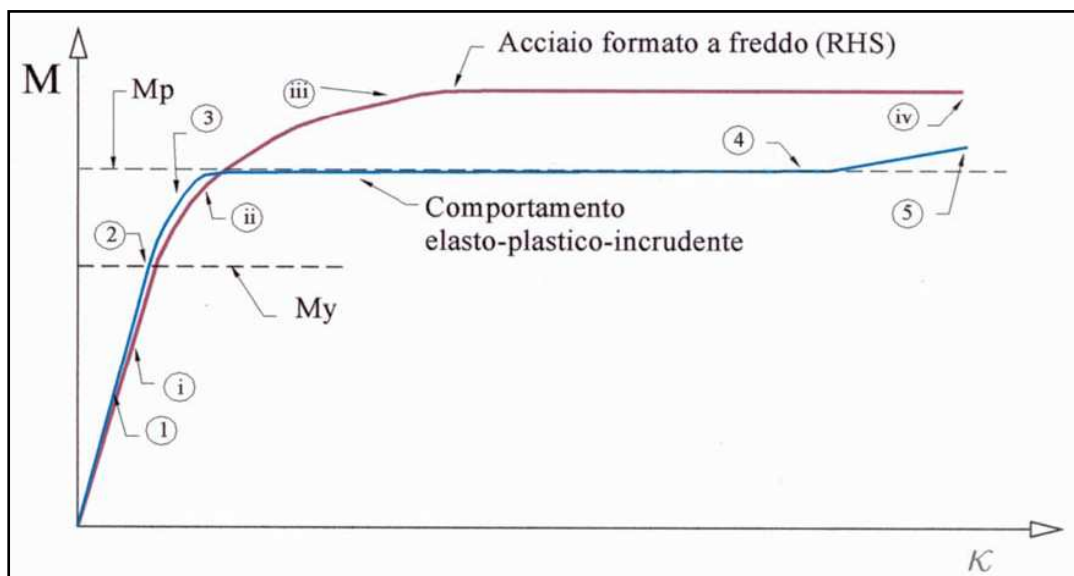


**Fig. 1.10** Comportamento elasto-plastico

Osservando la prima sequenza di diagrammi, fig.1.9, si può notare come, nel caso di RHS formati a caldo, la sezione giunga alla “completa” plasticizzazione per valori elevati di curvatura (teoricamente si può giungere alla plasticità totale solo con una curvatura infinita); il momento corrispondente è detto momento plastico. Aumentando ulteriormente la curvatura si manifesta il cosiddetto incrudimento, caratterizzato dalla presenza di fibre con tensioni superiori al valore corrispondente allo snervamento (strain hardening).

Analizzando, invece, la fig. 1.10 si nota invece come nel caso di profili laminati a freddo la tensione di snervamento venga superata per valori della curvatura minori rispetto al caso precedente. Ciò è dovuto all'assenza di un plateau ben plastico a causa di un incrudimento subito attivabile dopo lo snervamento.

Nella fig. 1.11 sono riportati i diagrammi momento-curvatura per entrambi i tipi di legame:



**Fig. 1.11** Diagrammi momento-curvatura relativi ai legami considerati

Esaminando il diagramma relativo al legame elasto-plastico-incrudente si può vedere come la curva, una volta terminato il tratto lineare, subisca una transizione dal momento di snervamento al momento plastico per poi proseguire con il plateau plastico. Una volta raggiunta la completa plasticizzazione, è evidente che la sezione può subire incrementi di curvatura senza la necessità di aumentare il valore del momento; a questa condizione viene di regola fatta corrispondere la formazione della così detta “cerniera plastica”, definita in letteratura come una cerniera ideale dotata di attrito in cui le due sezioni ad essa adiacenti non ruotano fino a quando il momento è compreso nell'intervallo  $-M_p < M < M_p$ .

In realtà, grazie all'incrudimento, il momento può superare il valore della fase plastica. Tuttavia, poiché tale incremento richiederebbe generalmente rotazioni concentrate non compatibili con la funzionalità della struttura, tale contributo non è attivabile e pertanto non può essere messo in conto.

Per quanto riguarda la curva relativa ai profili RHS formati a freddo, invece, si nota come in questo caso lo snervamento si manifesti per valori del momento inferiori a  $M_{y,}$ , ovvero del momento di snervamento; tale comportamento è dovuto sì alla particolare forma del legame tensione-deformazione, ma soprattutto alla presenza di tensioni residue nel materiale, conseguenti al tipo di lavorazione a cui questo è stato sottoposto.

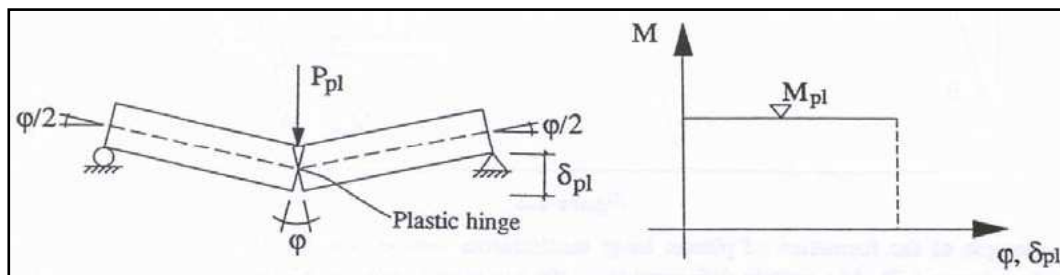
Infine, un'ulteriore ipotesi comunemente accettata è quella di trascurare le deformazioni della fase elastica rispetto a quelle della fase plastica; ciò nella pratica si traduce schematizzando il legame come “rigido-perfettamente plastico”.

### 1.3 Capacità rotazionale di un profilo RHS

Il collasso nel caso dei profili RHS è generalmente attribuito al raggiungimento della resistenza limite del materiale base oppure, e più frequentemente, a fenomeni di instabilità locale negli elementi costituenti l'elemento. Questi si manifestano con la formazione di una bozza o più bozze sulla flangia compressa; sono invece escluse dalle possibili cause di collasso l'instabilità laterale e quella fuori piano.

Lo sviluppo dei fenomeni locali può far sì che la trave arrivi al collasso prima dell'esaurimento delle riserve di resistenza del materiale, di conseguenza, è possibile che la trave vada in crisi senza aver raggiunto il momento limite di snervamento o il momento plastico.

Quando invece la trave è in grado di raggiungere il momento plastico, secondo le ipotesi in uso nella teoria tecnica delle travi, il diagramma momento-rotazione si può schematizzare come bilineare, fig. 1.12.



**Fig. 1.12** Idealizzazione bilineare della cerniera plastica

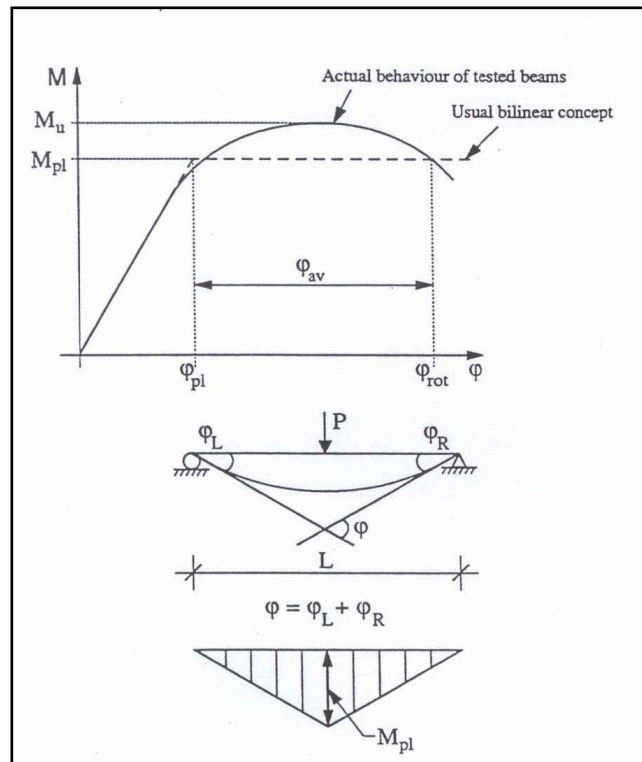
In realtà, però, il comportamento è sensibilmente diverso da quello derivante dalla teoria tecnica, il diagramma momento-rotazione, infatti, presenta sia curve comprese tra il momento elastico e quello plastico, sia curve che superano il valore del momento plastico; quest'ultime dovute all'incrudimento dell'acciaio.

Durante il processo deformativo, le tensioni, a causa dei fenomeni di instabilità locale, vengono ridistribuite all'interno della sezione stessa provocandone una perdita di resistenza; tale perdita comporta una riduzione di momento la quale preclude la possibilità di raggiungere il momento plastico ovvero la completa plasticizzazione della sezione.

Al fine di misurare la capacità rotazionale della cerniera plastica viene comunemente introdotto il parametro "R" che esprime la duttilità per gli elementi inflessi.

Un fattore presente nell'espressione di "R" è quello relativo alla rotazione disponibile  $\varphi_{av}$ ; tale valore è stato introdotto in quanto per valutare la capacità rotazionale di una sezione è necessario far riferimento alle rotazioni che si sviluppano dopo il raggiungimento del momento plastico.

Per spiegare il significato di rotazione plastica disponibile consideriamo una trave inflessa semplicemente appoggiata soggetta ad un carico verticale in mezzzeria. Il diagramma momento-rotazione corrispondente, è riportato fig. 1.13.



**Fig. 1.13** Significato di rotazione plastica disponibile

Come si evince dal diagramma, la rotazione cercata vale:

$$(1.4) \quad \varphi_{av} = \varphi_{rot} - \varphi_{pl}$$

dove  $\varphi_{rot}$  è il valore della rotazione al quale corrisponde sul ramo discendente dalla curva un momento pari a  $M_{pl}$ , mentre  $\varphi_{pl}$  rappresenta la rotazione al limite elastico, ovvero quella a partire dalla quale sulla curva teorica si sviluppa il plateau plastico.

Dalla definizione della capacità rotazionale “R” discende quella di capacità rotazionale disponibile  $R_{av}$ , espressa dal rapporto tra la rotazione plastica disponibile e quella elastica calcolata al livello del momento plastico  $\varphi_{pl}$ .

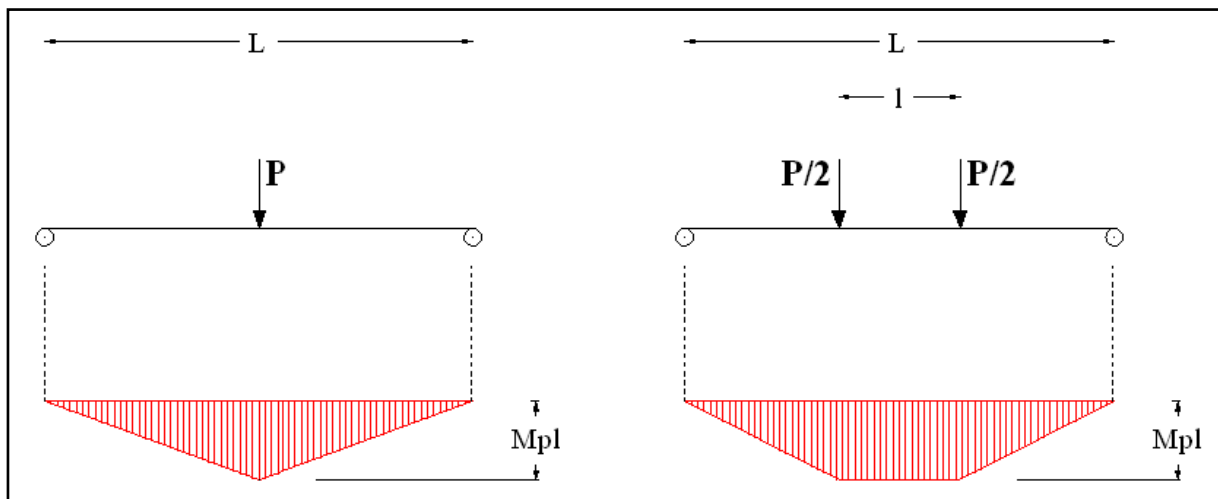
$$(1.5) \quad R_{av} = \frac{\varphi_{av}}{\varphi_{pl}}$$

Il numeratore dell'espressione (1.5) è già stato definito. Per quanto riguarda il valore di  $\varphi_{pl}$ , essendo tale rotazione calcolabile mediante l'integrale sulla lunghezza della trave, della curvatura, possiamo assumere il risultato di una delle seguenti espressioni:

$$(1.6) \quad \varphi_{pl} = \frac{L M_{pl}}{2 E J}$$

$$(1.7) \quad \varphi_{pl} = \frac{(L + l) M_{pl}}{2 E J}$$

La prima è valida nel caso in cui si abbia una prova a flessione su tre punti, come mostrato in fig. 1.14, la seconda, invece, risulta valida nel caso in cui la prova sia stata effettuata su quattro punti fig.1.15.



**Fig. 1.14** Schema di prova a flessione su 3 punti

**Fig. 1.15** Schema di prova a flessione su 4 punti

E' da notare come il concetto di capacità di rotazione disponibile sia, a causa del parametro  $\varphi_{pl}$ , influenzato dalla lunghezza "L" della trave che non è un parametro locale ma strutturale e come questo nella pratica possa comportare difficoltà nel definire in modo chiaro la lunghezza di riferimento.

Per porre rimedio a questo problema, Wilkinson definisce la capacità di rotazione "R" in termini di curvatura e non di rotazione e scinde la curvatura elastica da quella plastica; in questo modo, essendo l'aliquota elastica ( $M_{pl} L/EI$ ) indipendente dalla lunghezza di riferimento, si arriva ad un valore della capacità rotazionale che può essere considerato come una proprietà del profilo.

Al fine di controllare la duttilità di una cerniera plastica si può quindi, in maniera più semplice, confrontare non la capacità rotazionale ma direttamente la rotazione plastica disponibile  $\varphi_{av}$  con quella richiesta  $\varphi_{req}$ .

Questa preferenza trova anche ragione nel fatto che le dimensioni della sezione e le proprietà del materiale influenzano le rotazioni plastiche le quali, tranne casi in cui i vincoli laterali consentano instabilità laterale o flesso torsionale, non dipendono dalla lunghezza L.

A conclusione di quanto esposto possiamo affermare che:

- La rotazione plastica disponibile  $\varphi_{av}$  risulta un parametro attendibile per stabilire la possibilità di utilizzo di un profilo per un'analisi plastica in quanto è un parametro in grado di caratterizzare la capacità di deformazione di una sezione trasversale soggetta a flessione.
- La capacità di rotazione disponibile  $R_{av}$  dipende dalla lunghezza totale della trave.
- La rotazione plastica disponibile  $\varphi_{av}$ , nel caso di prova a flessione su quattro punti è formata da due aliquote, una legata alla zona della trave a momento costante, l'altra dovuta alla zona interessata dalla cerniera plastica. Si noti però come solo la zona della cerniera plastica possa essere considerata come caratteristica della sezione trasversale in quanto il contributo di rotazione dovuta alla zona a momento costante è dipendente dalla distanza "l" tra i carichi, cioè da un parametro non locale ma strutturale.

## **2- TENSIONI RESIDUE**

### **2.1 Generalità**

Molti elementi possono, durante l'uso, presentare instabilità statica e deformarsi in maniera indesiderata o incorrere in cedimenti prematuri: la vita di un componente dipende quindi dall'interazione tra il materiale e gli sforzi a cui esso è sottoposto. Gli sforzi non sono solo quelli imposti durante l'utilizzo dell'elemento, ma anche quelli presenti in esso perché generate durante il processo produttivo: tali sforzi sono noti come sforzi residui.

Ogni sforzo residuo nel prodotto è in genere indesiderato poiché abbassa il limite elastico e causa la tendenza del componente a deformarsi durante le successive lavorazioni; non sempre però gli sforzi residui sono da considerarsi dannosi. In un componente gli sforzi residui di trazione in superficie riducono le prestazioni meccaniche del materiale e la sua resistenza a "stress corrosion", favorendo nel contempo la suscettibilità a fatica e l'insorgere di fratture fragili e di fenomeni di usura; gli sforzi di compressione, invece, hanno un effetto benefico in quanto ritardano l'insacco e la propagazione delle cricche.

In campo elastico questi sforzi vengono sommati a quelli derivanti dal carico applicato, quindi nel caso di sforzi residui di compressione il livello di tensione negli strati in cui il carico è elevato si riduce.

Se volessimo dare una definizione di sforzi residui diremmo che sono sforzi di trazione o di compressione a risultante nulla senza che vi sia applicato un carico esterno, in un componente che risulta, quindi, in equilibrio; di solito essi sono presenti in zone ben delimitate ed hanno il loro massimo in superficie. Solitamente questi sforzi si generano a causa di una deformazione plastica non omogenea che può derivare, oltre che dall'applicazione di un carico, anche da una contrazione o dilatazione termica o da una trasformazione di fase avvenuta durante il processo di produzione dell'elemento. In sintesi le cause della presenza degli sforzi residui possono essere di carattere meccanico, termico o chimico.

Quelli generati meccanicamente derivano spesso dalle lavorazioni di deformazione plastica che producono deformazioni non uniformi nel volume del pezzo e sulla superficie esterna; quelli di origine termica dipendono da processi di riscaldamento e raffreddamento non uniformi mentre quelli generati chimicamente sono invece associati a cambiamenti di volume durante reazioni chimiche.

Infine è importante ricordare che, normalmente, maggiore è il valore del carico di snervamento del pezzo, maggiore è la possibilità di avere sforzi residui.



## **2.2 Classificazione degli sforzi residui**

Gli sforzi residui possono essere distinti in categorie secondo diversi criteri: in base alla causa che gli genera, di cui si è parlato nel paragrafo precedente, in base all'ordine di grandezza su cui si auto-equilibrano o in base al metodo con cui vengono misurati.

Se consideriamo la classificazione fatta in base all'ordine di grandezza si definiscono tre diversi tipi di sforzi:

- **PRIMO TIPO:** sforzi che interessano qualche grano cristallino del materiale; sono quelli che si originano soprattutto in seguito a processi di laminazione, finitura ed anche nella saldatura e nei trattamenti termici superficiali.
- **SECONDO TIPO:** sforzi che interessano a livello microscopico un grano particolare del materiale;
- **TERZO TIPO:** sforzi che interessano un'area sub-microscopica, tipicamente includono gli sforzi dovuti alla coerenza di interfaccia e ai campi di sforzo delle dislocazioni.

Solitamente nella valutazione della vita in servizio di un componente metallico gli sforzi residui del II e III tipo sono trascurabili e si pone l'attenzione solo agli sforzi del I tipo.

## 2.3 Sforzi residui dovuti alla laminazione a freddo

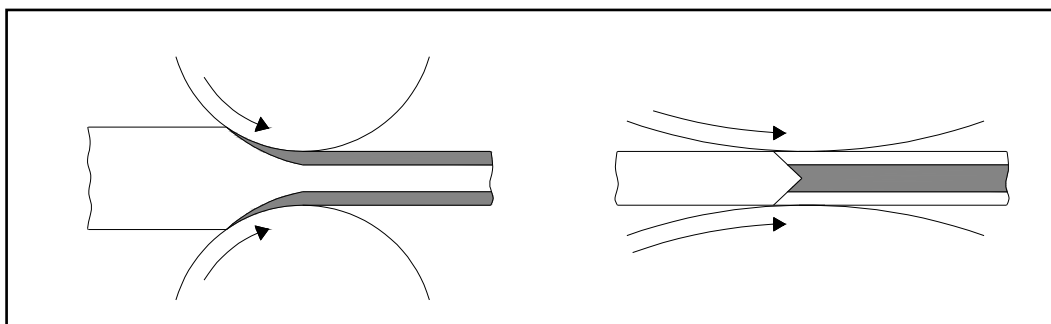
Quando un materiale viene utilizzato per realizzare un componente subisce un procedimento meccanico e tecnologico atto a conferire la forma e le dimensioni finali. Durante tale processo il materiale è sottoposto a piegatura, laminazione, rotazione, stiramento, compressione, riscaldamento, raffreddamento, saldatura, finitura, rivestimento. Tutte queste operazioni comportano lo sviluppo di uno stato di sforzi residui, soprattutto sulla superficie del materiale.

Gli sforzi residui possono inoltre svilupparsi anche nel montaggio dei componenti, quando due parti non si adattano perfettamente tra loro; in questi casi gli sforzi che si generano possono essere considerati sia come sforzi dovuti a carichi esterni che come sforzi residui a seconda che si considerino le parti singolarmente o nel loro complesso.

Durante la laminazione gli sforzi residui possono essere generati dal gradiente di deformazione plastica che si genera nello spessore del laminato durante il passaggio tra i rulli.

In generale si possono distinguere due casi:

- a) Rulli di diametro piccolo o riduzioni basse, tendono a plasticizzare il metallo solo in superficie; questo genera sforzi residui di compressione in superficie e sforzi di trazione nel centro, fig. 2.1 sinistra.
- b) Rulli di diametro maggiore e alte riduzioni tendono a deformare più il cuore che la superficie a causa del vincolo rappresentato dall'attrito lungo l'arco di contatto; questa situazione genera sforzi residui opposti al caso precedente, fig. 2.1 destra.



**Fig. 2.1** Tipi di rulli per la laminazione

La situazione più comune di distribuzione degli sforzi residui nei laminati è rappresentata dal secondo caso con un massimo di trazione su entrambe le superfici ed un massimo di compressione sul piano di simmetria. La forma esatta della curva di distribuzione varia con la riduzione data al laminato e, inoltre, ci si aspetta un qualche grado di non uniformità nella distribuzione degli sforzi residui anche nella direzione trasversale.

Quando tale distribuzione è simmetrica rispetto alla linea centrale, gli sforzi residui sono in equilibrio ed il laminato non presenta nessuna tendenza ad incurvarsi (fenomeno chiamato “curling”), ma qualora quest’equilibrio venisse alterato, tagliando il materiale o rimuovendo uno strato, il manufatto può assumere una nuova forma per garantire il bilancio delle forze interne.

Si ha invece incurvamento del laminato quando gli sforzi residui sono sbilanciati per uno o più di questi motivi:

- Diametri differenti dei rulli di lavoro;
- Differenti velocità superficiali dei rulli;
- Differenti condizioni di lubrificazione lungo l’arco di contatto;
- Non perpendicolarità tra il piano del laminato e il piano contenente i rulli;
- Inclinazione della direzione di passaggio del laminato.

La presenza di sforzi residui può causare altri effetti di distorsione oltre quello di incurvatura: sforzi residui trasversali possono causare una bombatura (“crossbow”), mentre la presenza contemporanea di sforzi trasversali e longitudinali può dar luogo a una torsione del laminato.

Del fenomeno delle tensioni residue nella seguente tesi ne è stato tenuto conto sia per quanto riguarda la sperimentazione, nell’elaborazione dei dati ottenuti in laboratorio si sono, infatti, prese in considerazione anche le misurazioni delle imperfezioni dei profili, sia per quanto riguarda la modellazione inserendo un’imperfezione iniziale, come vedremo meglio nei capitoli successivi.

## **3- SNELLEZZA E INSTABILITA'**

### **3.1 Generalità**

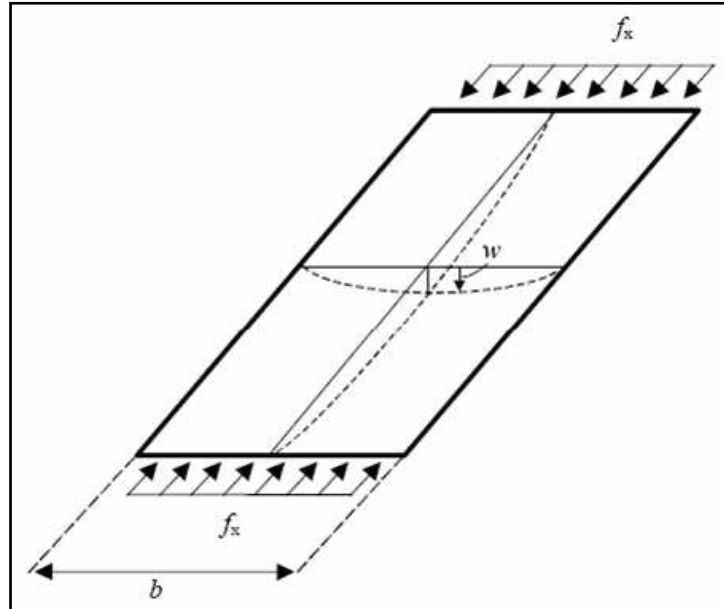
La maggior parte delle sezioni strutturali possono essere viste come formate da un certo numero di elementi piani. Nel nostro caso un profilo RHS può essere idealizzato come composto da quattro piatti uniti insieme.

Sottoponendo questi singoli piatti a compressione nel loro piano possono insorgere fenomeni di instabilità locale che si manifestano con ondulazioni aventi una lunghezza d'onda confrontabile con la larghezza della parte instabilizzata. L'effetto di questo fenomeno, che si cumula a quelli dovuti all'instabilità globale, è una riduzione di resistenza duttilità e rigidità dell'elemento.

Come già detto in precedenza l'analisi plastica che ci prefiggiamo di eseguire richiede che gli elementi della struttura, quindi anche i singoli piatti, siano in grado di deformarsi oltre lo snervamento al fine di consentire la redistribuzione delle sollecitazioni all'interno della struttura stessa. Per questo motivo le norme cercano di scongiurare fenomeni di instabilità locale ponendo dei limiti di snellezza.

### 3.2 Instabilità elastica di un piatto rettangolare

Consideriamo una lastra ideale avente una certa lunghezza, una certa larghezza “b” ed un certo spessore “t”, soggetta ad una certa tensione  $f_x$  agente nel suo piano, fig. 3.1.



**Fig. 3.1** Instabilità locale in una piastra rettangolare

Supponiamo inoltre che la lastra sia priva di imperfezioni e costituita da un materiale elastico lineare.

Se  $f_x$  è di compressione, la lastra può instabilizzarsi; la sua deformata è contraddistinta dagli spostamenti fuori piano indicati in fig. 3.1 con “w”.

Il piatto preso come esempio è semplicemente appoggiato, il ragionamento però non cambia qualora le condizioni di vincolo siano diverse.

L'equazione che governa il fenomeno dell'instabilità elastica della piastra è quella proposta da Bryan sotto riportata:

$$(3.1) \quad \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) = -f_x t \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$$

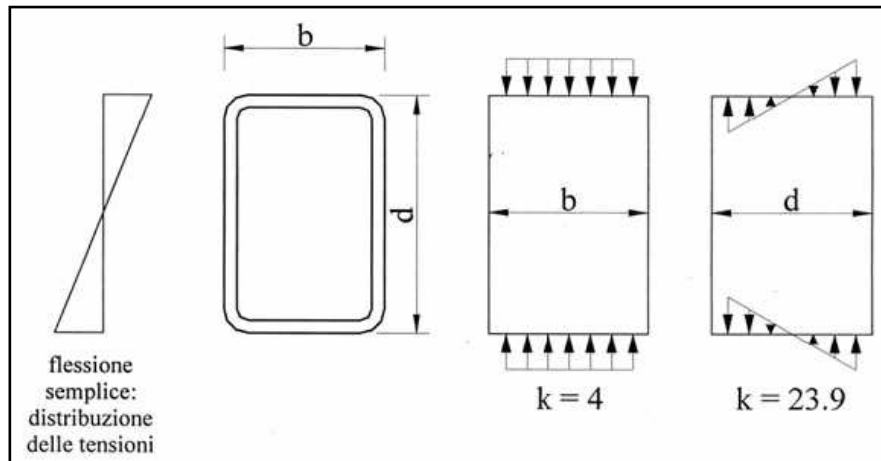
Indicando con  $f_0$  il valore critico della tensione, questo vale:

$$(3.2) \quad f_0 = \frac{k \pi^2 E}{12(1-\nu^2) \left( \frac{b}{t} \right)^2} = \frac{H^2}{\left( \frac{b}{t} \right)^2}$$

dove “k”, chiamato coefficiente di instabilità della piastra, dipende dai vincoli e dalla distribuzione della tensione lungo il piatto. Al fine di semplificare l'equazione ( 3.2 ) è stata introdotta la quantità

$$(3.3) \quad H^2 = \frac{k \pi^2 E}{12(1 - \nu^2)}$$

Se prendiamo un profilo RHS, fig. 4.2, possiamo studiare le flange come lastre semplicemente appoggiate su quattro lati soggette ad una tensione di compressione uniforme lungo due lati opposti  $k = 4$ , mentre l'anima può essere assimilata ad una lastra rettangolare appoggiata e soggetta a flessione nel proprio piano  $k = 23,9$



**Fig. 3.2** Coefficiente “k” in base alla distribuzione delle tensioni

In questa teoria viene introdotta la condizione:

$$(3.4) \quad f_y \leq \frac{H^2}{\left(\frac{b}{t}\right)}$$

in quanto si richiede che il piatto, prima di giungere alla crisi per instabilità, abbia subito deformazioni in campo plastico.

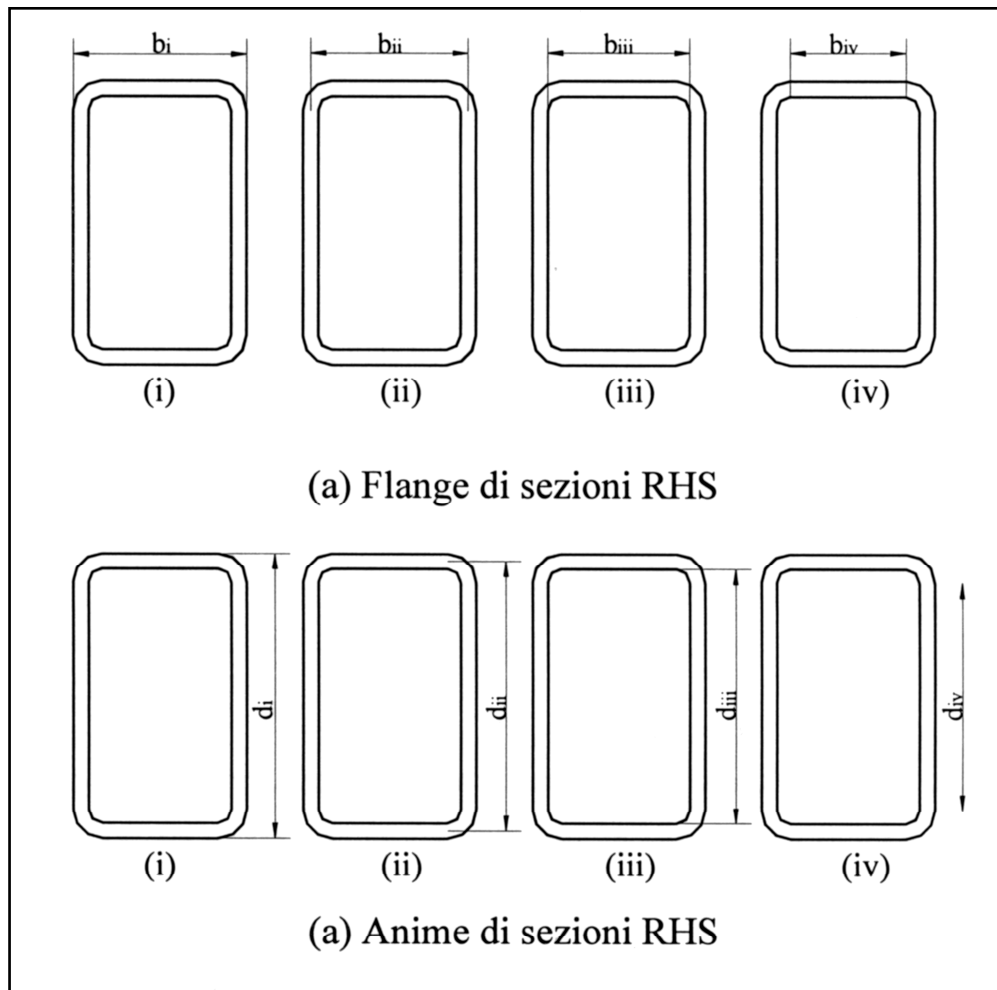
Se infine per comodità scriviamo la formula ( 3.4 ) in termini di H e di snellezza limite, definita come  $b/t$ , la condizione per evitare l'instabilità locale diventa:

$$(3.5) \quad \frac{b}{t} \leq \frac{H}{\sqrt{f_y}}$$

### 3.3 Definizione di snellezza e limiti

Quando ci riferiamo ad una singola piastra la definizione di larghezza è ovvia; quando invece si considerano le piastre come elementi di una sezione strutturale la definizione esatta di larghezza diventa meno scontata, specialmente se sono presenti delle saldature (per esempio per una sezione composta saldata a I) o delle parti di raccordo tra i vari elementi (per esempio nel caso di un profilo RHS). A questo proposito esistono quattro possibili definizioni che possono risultare appropriate come illustrato in fig. 3.3:

- larghezza totale (i)
- larghezza riferita all'asse del profilo (ii)
- larghezza netta (iii)
- larghezza relativa alla parte piana (iv)



**Fig.3.3** - Le diverse definizioni di larghezza e altezza di una sezione RHS

Le più comuni sezioni strutturali possono essere definite “a parete sottile” dato che le dimensioni  $b$  e  $d$  sono sensibilmente maggiori dello spessore  $t$ . Molti profili cavi formati a caldo hanno i raccordi tra anime e flange dotati di raggi di curvatura molto piccoli, quindi le quattro definizioni sopra riportate di  $b/t$  conducono a valori simili tra loro. A causa del processo di formazione a freddo, invece, nei profili CFRHS il valore del raggio del raccordo angolare è spesso nel campo  $2.0t \leq r \leq 2.5t$ , ci può quindi essere una sensibile differenza fra le varie definizioni di larghezza prima menzionate. La Tabella 3.1 elenca le definizioni di larghezza di piastra utilizzata dai diversi codici di progettazione, e mostra come non tutte le normative siano concordi su quale definizione utilizzare.

Codice	RHS anima o flangia	Anima profilo a I formata a caldo	Anima profilo a I formata a freddo	Flangia del I form. a caldo/freddo
Eurocodice 3	piana (a)	piana (iv)	piana (iv)	asse (ii)
BS 5950	piana (a)	piana (iv)	piana (iv)	asse (ii)
CSA S16.1	piana (iv)	netta (iii)	netta (iii)	asse (ii)
AS 4100	netta (iii)	netta (iii)	netta (iii)	netta (iii)
AISC LRFD	piana (iv)	piana (iv)	netta (iii)	asse (ii)

Note: (a) larghezza definita come  $b-3t$  o  $d-3t$  che è la larghezza piana assumendo  $r=1.5t$

(b) i simboli fra parentesi fanno riferimento alla fig. 4.3

**Tab.3.1** – Definizione di larghezza degli elementi piani presente nei vari Codici



Come già accennato la flangia compressa di una sezione scatolare, sia essa un RHS o un SHS, può essere studiata come una lastra semplicemente appoggiata sui quattro lati e soggetta ad una tensione di compressione uniforme lungo due lati opposti ( $k=4$ ), agente nel piano della lastra stessa; le anime invece possono essere assimilate a lastre rettangolari con il contorno appoggiato e soggette a flessione nel loro piano ( $k=23,9$ ). Partendo da queste ipotesi si può giungere alla determinazione di quali siano i limiti di snellezza necessari ad evitare la prematura manifestazione di fenomeni di instabilità.

Nelle Tabelle 3.2 e 3.3 sono riassunti, in modo schematico, i limiti di snellezza indicati da diversi codici di progettazione.

Codice	Snellezza Flangia ( $\lambda_f$ )	Limiti di Snellezza della Flangia		
		Classe 1 o Compact	Classe 2	Classe 3 Non-Compact
Eurocodice 3	$\frac{b-2t}{t} \sqrt{\frac{f_y}{250}}$	30	-	40
AS 4100	$\frac{b-3t}{t} \sqrt{\frac{f_y}{235}}$	33 32.0 (2)	38 36.8 (2)	42 40.7 (2)
AISC LRFD HSS 1997 (4)	$\frac{b-2r_e}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E}}$	0.939 26.6 (2)	-	1.4 39.6 (2)
AISC LRFD 1994 (5)	$\frac{b-2r_e}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E}}$	1.12 31.7 (2)	-	1.4 39.7 (2)

Note: (1) Il termine Compact dato dalla AS 4100 e dalla AISC è quello della Classe 1

(2) Riferito a  $f_y=250\text{MPa}$  ed  $E=200000\text{MPa}$  per analogia con la AS 4100

(3) Profili che superano la Cl.3 o Non-Compact sono di Cl.4 o Slender

(4) La AISC LRFD HSS (1997) si applica solo alle flange dei profili cavi

(5) La AISC LRFD 1994 si applica alle flange dei profili scatolari

**Tab.3.2** – Limiti di snellezza per la flangia dei profili RHS

Codice	Snellezza Anima ( $\lambda_w$ )	Limiti di Snellezza dell'Anima		
		Classe 1 o Compact	Classe 2	Classe 3 Non-Compact
Eurocodice 3	$\frac{d-2t}{t} \sqrt{\frac{f_y}{250}}$	82	-	115
AS 4100	$\frac{d-3t}{t} \sqrt{\frac{f_y}{235}}$	72 69.8 (2)	83 80.5 (2)	124 120.2 (2)
AISC LRFD	$\frac{d-2r_e}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E}}$	3.76 106 (2)	-	5.7 161 (2)

Note: (1) Il termine Compact dato dalla AS 4100 e dalla AISC è quello della Classe 1

(2) Riferito a  $f_y=250\text{MPa}$  ed  $E=200000\text{MPa}$  per analogia con la AS 4100

(3) Profili che superano la Cl.3 o Non-Compact sono di Cl.4 o Slender

**Tab.3.3** – Limiti di snellezza per l'anima dei profili RHS

## **4- RIFERIMENTI NORMATIVI**

### **4.1 Metodi di analisi e classificazione delle sezioni**

Le norme attualmente in vigore in Italia consentono, per quanto riguarda l'analisi strutturale, di utilizzare un modello elastico, a condizione però di considerare come azioni di calcolo quelle definite dal Decreto Ministeriale del 16/01/1996; invece per quanto concerne i metodi di verifica associati le medesime norme danno la possibilità di utilizzare sia il metodo delle tensioni ammissibili sia quello semiprobabilistico agli stati limite.

L'Eurocodice 3 invece, consente a seconda della Classe della membratura di cui è costituita la struttura di eseguire un'analisi globale plastica ed una conseguente verifica in campo plastico.

La scelta del tipo di analisi dipende come detto dalla Classe dei profili, per questo il punto 5.3 dell'UNI ENV 1993-1-1 classifica le sezioni trasversali in base al tipo di analisi globale che può essere impiegata.

Se per esempio decidiamo di impostare un'analisi elastica è possibile utilizzare un profilo appartenente a qualunque classe, tenendo ovviamente conto della limitata resistenza della sezione trasversale dovuta ad eventuali fenomeni di instabilità; qualora invece decidessimo di svolgere un'analisi globale plastica, nelle membrature devono potersi formare cerniere plastiche aventi sufficiente capacità rotazionale in modo da consentire alle caratteristiche di sollecitazione di ridistribuirsi all'interno della struttura, in questo caso quindi la classe della sezione diventa basilare.

Per avere un quadro generale di quanto detto, nel prospetto A sono riportati il tipo di analisi strutturale che si può utilizzare per ogni singola classe con il relativo metodo di verifica.

Classe	Analisi strutturale	Verifica
1	Globale elastica Globale plastica	Campo elastico Campo plastico
2	Globale elastica	Campo elastico Campo plastico
3	Globale elastica	Campo elastico
4	Globale elastica (effettiva sezione reagente)	Campo elastico (verifica Buckling)

**Prospetto A**

L'Eurocodice 3 stabilisce inoltre che nello studio del comportamento globale della struttura o dei suoi elementi, l'analisi plastica può essere utilizzata solo se l'acciaio soddisfa anche ai seguenti requisiti:

- il rapporto tra resistenza minima a rottura per trazione  $f_u$  e resistenza minima di snervamento  $f_y$ , ( $f_u / f_y$ ) sia  $\geq 1,2$ ;
- allungamento a rottura, definito considerando una larghezza della base di riferimento pari a  $5,65 \times (A_o)^{-1}$  non sia minore del 15% ( $A_o$  indica l'area della sezione trasversale iniziale);
- il diagramma tensione-deformazione mostri una deformazione  $\epsilon_{u,}$  corrispondente alla resistenza a rottura per trazione  $f_{u,}$  almeno 20 volte superiore alla deformazione  $\epsilon_{y,}$  corrispondente alla resistenza di snervamento  $f_y$ .

Entrando nello specifico della classificazione le sezioni trasversali in acciaio vengono suddivise, secondo l'Eurocodice 3, in quattro classi:

**CLASSE 1**

La sezione è in grado di attingere al proprio momento plastico e mantenerlo entro un certo intervallo di rotazioni; la sezione quindi evolve in campo plastico senza apprezzabili riduzioni di resistenza per un tratto sufficientemente ampio.

Il limite di accettabilità per la Classe 1 è espresso dal valore della capacità rotazionale  $R > 3$ , dove  $R$  è definito come il rapporto tra la rotazione plastica disponibile e quella teorica elastica calcolata a livello del momento plastico.

Per quanto riguarda i profili cavi la questione è sempre aperta; i ricercatori Zhao e Hancock, ad esempio, raccomandano un valore di  $R$  pari a 4, dove:

$$R = \frac{k}{k_p} - 1$$

in cui

$$k_p = \frac{M_p}{EJ}$$

## **CLASSE 2**

La sezione riesce ad attingere al momento plastico ma ha capacità di rotazione modesta, ovvero la sezione è in grado di plasticizzarsi ma subito dopo perde resistenza per effetto dell'instabilità degli elementi che la costituiscono.

Le sezioni di classe 2 non garantiscono quindi il momento plastico all'aumentare delle rotazioni.

## **CLASSE 3**

La sezione è in grado di attingere al momento di snervamento (plasticizzazione della fibra estrema), ma non a quello plastico.

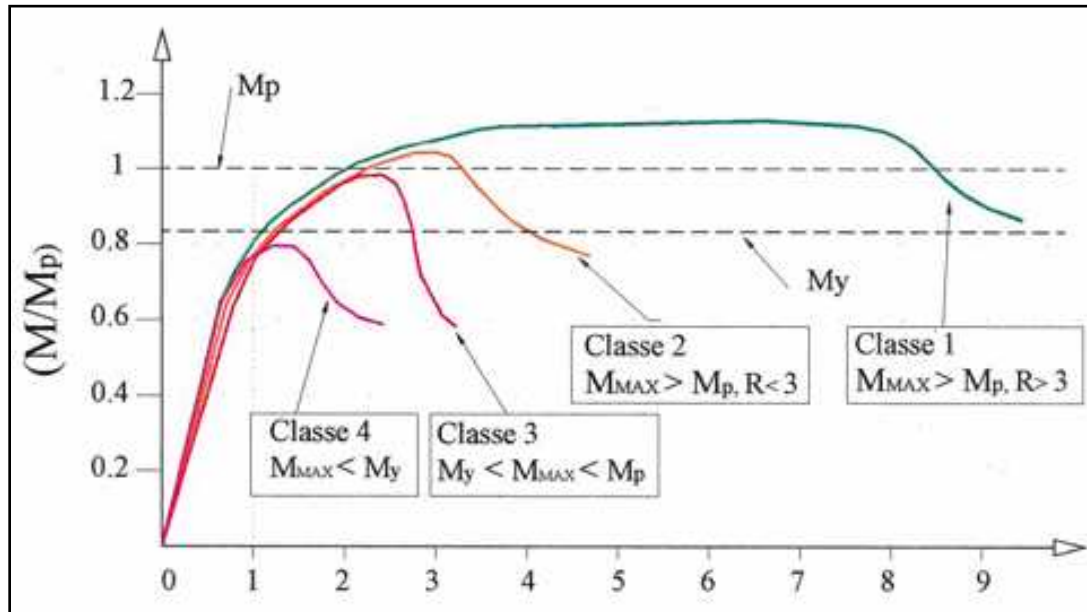
In pratica una sezione di classe 3 raggiunge lo snervamento nelle fibre estreme, dopo di che alcune sue parti si instabilizzano in campo elastico causando una diminuzione di capacità portante.

## **CLASSE 4**

La sezione non è in grado di attingere nemmeno al momento di snervamento; alcune delle sue parti costituenti si instabilizzano in campo elastico prima ancora che si siano snervate le fibre estreme.

Nel caso di sezione di classe 4 è quindi necessario mettere esplicitamente in conto gli effetti dell'instabilità locale sia per determinare il loro momento resistenze sia per determinare la loro resistenza a compressione.

Nella fig. 4.1 è riportato il diagramma che illustra la classificazione suddetta.



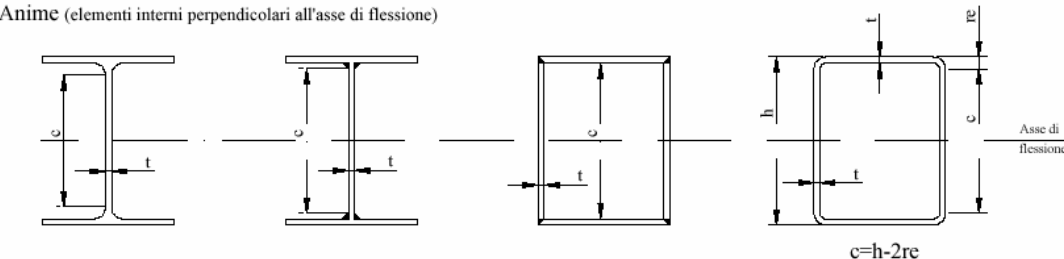
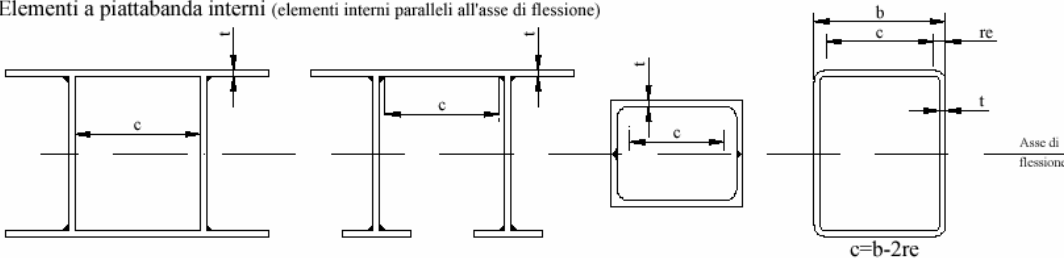
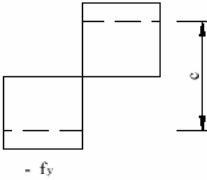
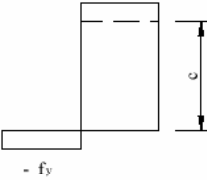
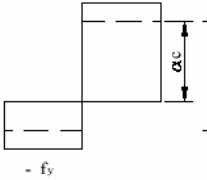
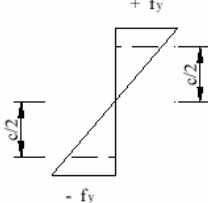
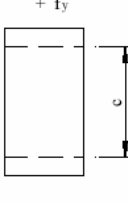
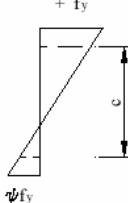
**Fig.4.1** – Diagramma  $M/M_p - k/k_p$

La classificazione di una sezione trasversale dipende dal rapporto tra la larghezza e lo spessore degli elementi compressi, dove per elementi compressi si intende ogni parte della sezione soggetta totalmente o parzialmente a compressione sotto la condizione di carico considerata.

I vari elementi compressi possono anche appartenere a classi diverse, in questo caso la sezione verrà classificata come la più sfavorevole, oppure indicando sia la classe dell'anima che quella dell'ala.

Dal punto di vista operativo, nel caso in cui la sezione trasversale risulti di classe 4, per tener conto della riduzione di resistenza dovuta agli effetti dell'instabilità locale vengono generalmente utilizzate le larghezze efficaci.

Nel prospetto B sono riportati i rapporti dimensionali limite per gli elementi compressi delle classi 1,2 e 3, ricordando che, qualora un elemento non soddisfi i limiti previsti per la classe 3 viene considerato appartenente alla quarta classe.

<p>Anime (elementi interni perpendicolari all'asse di flessione)</p>  <p><math>c=h-2r_e</math></p>				
<p>Elementi a piattabanda interni (elementi interni paralleli all'asse di flessione)</p>  <p><math>c=b-2r_e</math></p>				
Classe	Anima soggetta a flessione	Anima soggetta a compressione	Anima soggetta a fless. e compr.	
Distribuzione tensioni negli elementi (compressione positiva)	 <p>+ <math>f_y</math> - <math>f_y</math></p>	 <p>+ <math>f_y</math> - <math>f_y</math></p>	 <p>+ <math>f_y</math> - <math>f_y</math></p>	
1	$c/t \leq 72\varepsilon$	$c/t \leq 33\varepsilon$	<p>Quando <math>\alpha &gt; 0,5</math>: <math>c/t \leq 396\varepsilon/(13\alpha-1)</math></p> <p>Quando <math>\alpha &lt; 0,5</math>: <math>c/t \leq 36\varepsilon/\alpha</math></p>	
2	$c/t \leq 83\varepsilon$	$c/t \leq 38\varepsilon$	<p>Quando <math>\alpha &gt; 0,5</math>: <math>c/t \leq 456\varepsilon/(13\alpha-1)</math></p> <p>Quando <math>\alpha &lt; 0,5</math>: <math>c/t \leq 41,5\varepsilon/\alpha</math></p>	
Distribuzione tensioni negli elementi (compressione positiva)	 <p>+ <math>f_y</math> - <math>f_y</math></p>	 <p>+ <math>f_y</math> - <math>f_y</math></p>	 <p>+ <math>f_y</math> - <math>\psi f_y</math></p>	
3	$c/t \leq 124\varepsilon$	$c/t \leq 42\varepsilon$	<p>Quando <math>\psi &gt; 1</math>: <math>c/t \leq 42\varepsilon/(0,67+0,33\psi)</math></p> <p>Quando <math>\psi \leq 1</math>: <math>c/t \leq 62\varepsilon(1-\psi)(-\psi)^{1/2}</math></p>	
$\varepsilon=(235/f_y)^{1/2}$	$f_y$	235	275	355
	$\varepsilon$	1	0,92	0,81

**Prospetto B**

## 4.2 Confronto tra normative

Alcuni codici, come ad esempio l'AS 4100 e l'AISC LRFD, raggruppano le sezioni di Classe 2 e 3 in una sola classe, comunemente definita come non-compatta.

Secondo la definizione data dai codici AS 4100 e AISC LRFD, le sezioni “non-compatte” permettono di superare il momento di snervamento per giungere fino a quello plastico, ma non possono sostenerlo per rotazioni sufficientemente grandi.

Per evitare incomprensioni nella seguente tesi verranno utilizzati i termini generici “Classe 1”, “Classe 2”, “Classe 3” e “Classe 4” per le diverse sezioni.

Il prospetto C riassume la terminologia usata in alcuni dei codici più noti.

SPECIFICATION				
Eurocodice 3	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
BS 5950	Plastic	Compact	Semi-Compact	Slender
CSA S16.1	Plastic or Class 1	Compact or Class 2	Semi-Compact or Class 3	Slender or Class 4
AS 4100	Compact	Non-Compact		Slender
AISC LRFD	Compact	Non-Compact		Slender

**Prospetto C**

## 5- INDAGINI Sperimentali



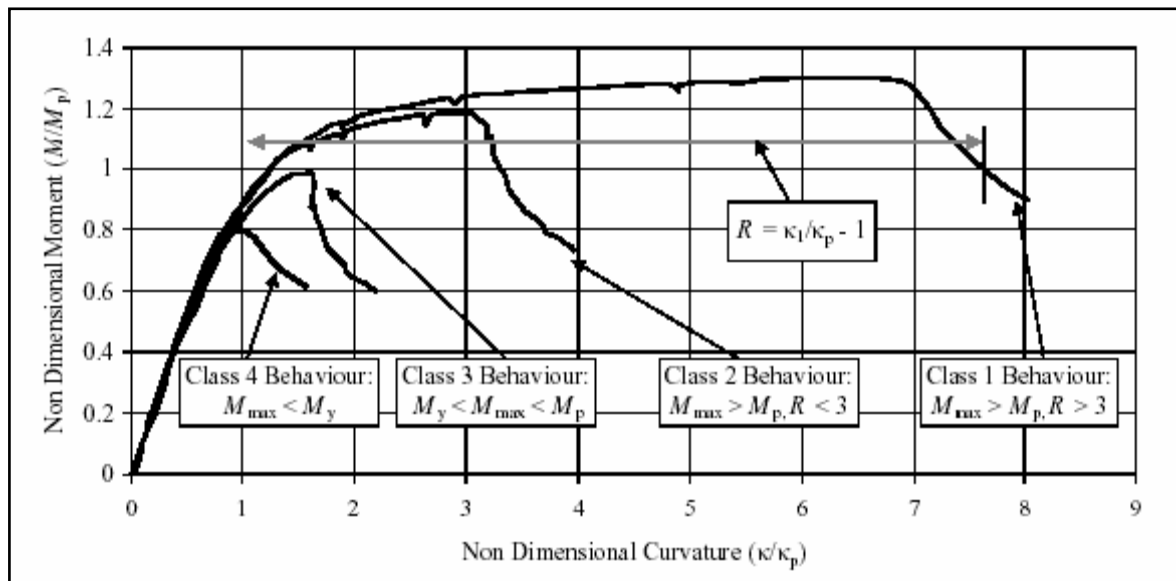
## 5.1 Generalità

Nel seguente capitolo si descrivono le operazioni di laboratorio ed i risultati delle prove di flessione svolte nell'ambito della presente tesi, a completamento di una campagna sperimentale iniziata alcuni anni fa dal Dipartimento di Ingegneria Strutturale di Pisa, con l'obiettivo di verificare l'adeguatezza dell'impiego di profili cavi sagomati a freddo nella progettazione in campo plastico.

Molti codici di progettazione attuali, proprio per mancanza di un adeguato livello di conoscenze specifiche su questi elementi, ne limitano severamente o addirittura impediscono questo tipo di analisi.

Nel Capitolo 4 è stato introdotto il concetto di Classe per diversi profili. Per essere utilizzato in campo plastico, un profilo deve essere in grado di raggiungere il suo momento plastico e di deformarsi in modo tale da possedere una rotazione sufficientemente elevata; un tale tipo di profilo è definito di Classe 1.

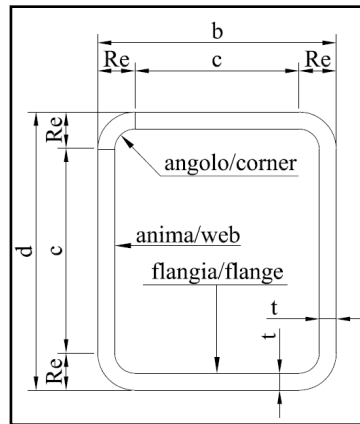
La fig. 5.1 mostra i diversi tipi di comportamento flessionale dei profili in acciaio.



**Fig. 5.1** Comportamento di profili RHS (Classificazione secondo l'EC3)

Come già accennato i profili sono classificati in base all'effetto che l'instabilità locale ha sul comportamento flessionale della trave. Il fattore principale che influenza l'instabilità locale è il rapporto tra le dimensioni geometriche ( $b/t$ ,  $d/t$  o  $c/t$  fig. 5.2) degli elementi piani

compressi componenti il profilo. Perciò, al fine della classificazione dei profili, le raccomandazioni dei codici definiscono dei limiti per tali grandezze.



**Fig. 5.2** Sezione trasversale profilo RHS

Secondo alcune indagini, i limiti di snellezza forniti dall'Eurocodice 3, che sono il risultato di prove e studi eseguiti su profili a I o su elementi piastra successivamente estesi anche ai profili RHS, sono risultati non cautelativi per quest'ultimo tipo di profili.

La discordanza deriva dal fatto che la capacità di rotazione è funzione sia della snellezza dell'anima che della flangia; l'approccio, sicuramente inadeguato, dell'Eurocodice 3 è invece quello di considerare tali limiti indipendenti tra loro.

Il presente lavoro si prefigge proprio il fine di studiare l'influenza reciproca della snellezza di flangia e anima sulla capacità di rotazione dei profili RHS formati a freddo.

## **5.2 Programma delle prove sperimentali**

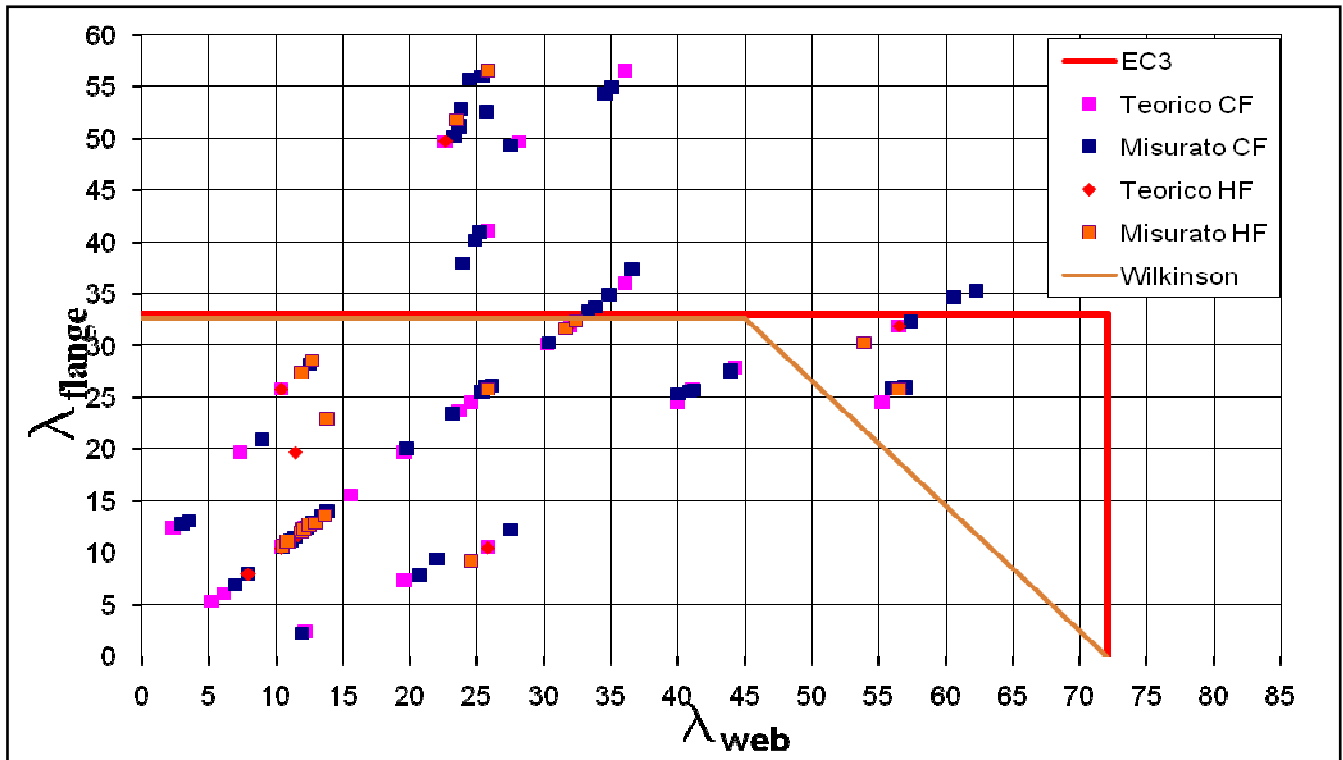
I profilati RHS scelti, da utilizzare nelle prove, differiscono per dimensioni trasversali, per valori di snervamento dell'acciaio (S355-S275-S235), per valori di resilienza (J2H, JOH, JR) e per processi di formazione (cold formed e hot formed).

Le indagini sperimentali sono state dedicate alla valutazione della reale capacità di rotazione dei profili RHS.

I profili testati sono stati scelti in base alle seguenti considerazioni:

- ✓ dimensioni tali da coprire l'intero campo delle sezioni di Classe 1 secondo l'Eurocodice 3, specialmente nell'intorno dei limiti superiori della Classe 1;
- ✓ sezioni con alta percentuale di formatura a freddo (valori piccoli del rapporto tra la lunghezza dell'anima o della flangia e lo spessore);
- ✓ sezioni decisamente di Classe 1, da usare come termine di paragone;
- ✓ rapporti di forma B/H (larghezza altezza) diversi;
- ✓ al fine di controllare l'influenza della snellezza delle anime sulla classificazione de profilo, alcuni profili sono stati selezionati opportunamente in modo da risultare di Classe 1 secondo l'Eurocodice 3 e di Classe 2 secondo la classificazione proposta da Hancock e Wilkinson; tali profili sono quelli aventi dimensioni: 400x200x8, 200x100x4, 250x150x5, e infine 120x80x3, quest'ultimo sta sulla linea di confine della classificazione dovuta a Hancock e Wilkinson.

Nella fig.5.3, per semplificare la lettura, i profili testati sono stati rappresentati in funzione della snellezza dell'anima e della flangia ( $\lambda_w$ ,  $\lambda_f$ ), ottenute dai valori nominali e reali delle dimensioni della sezione trasversale; in tale grafico le linee rosse indicano i confini della Classe 1 secondo l'Eurocodice 3, mentre le linee verdi indicano quelli proposti da Hancock e Wilkinson.



**Fig. 5.3** Classificazione dei profili attraverso le snellezze  $\lambda_w$  e  $\lambda_f$

Nelle tabelle di seguito riportate sono indicati i profili tubolari separati per tipo di lavorazione (cold formed, hot formed); per ogni profilo è stato indicato il numero identificativo del test, il nome del profilo, le principali caratteristiche geometriche e le snellezze, sia dell'anima che della flangia.

In particolare, la Tabella 5.1 si riferisce ai valori nominali delle caratteristiche geometriche dei profili formati a freddo (CFRHS) testati precedentemente allo svolgimento della presente tesi; la Tabella 5.3 si riferisce ai valori misurati degli stessi profili.

Analogamente le tabelle 5.2 e 5.4 si riferiscono rispettivamente ai valori nominali e misurati dei profili formati a caldo (HFRHS) testati nella stessa fase della campagna sperimentale.

Infine le tabelle 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8 si riferiscono ai profili testati durante lo svolgimento di questa tesi; in tale ambito sono stati elaborati i dati di output di tutti test riportati nelle tabelle.

TEST	Profilo	F/FV	Materiale	b (mm)	h (mm)	b/h	t(mm)	b/t	re (mm)	$\lambda_w$ (mm)	$\lambda_f$ (mm)
1	200-200-7	F	S355J0H	200,00	200,00	1,00	7,00	28,57	14,00	30,20	30,20
3	100-100-8	F	S355J0H	100,00	100,00	1,00	8,00	12,50	16,00	10,45	10,45
4	200-100-12.5	FV	S355J2H	100,00	200,00	0,50	12,50	8,00	37,50	12,29	2,46
5	100-100-10	F	S355J2H	100,00	100,00	1,00	10,00	10,00	25,00	6,15	6,15
6	300-200-8	FV	S355J2H	200,00	300,00	0,67	8,00	25,00	20,00	39,95	24,58
7	300-200-8	FV	S355J2H	200,00	300,00	0,67	8,00	25,00	20,00	39,95	24,58
8	400-200-8	FV	S355J2H	200,00	400,00	0,50	8,00	25,00	20,00	55,31	24,58
9	200-100-4	FV	S355J2H	100,00	200,00	0,50	4,00	25,00	8,00	56,54	25,81
10	120-60-6	FV	S355J2H	60,00	120,00	0,50	6,00	10,00	12,00	19,67	7,37
11	120-80-3	FV	S355J2H	80,00	120,00	0,67	3,00	26,67	6,00	44,25	27,86
12	120-80-3	FV	S355J2H	80,00	120,00	0,67	3,00	26,67	6,00	44,25	27,86
13	120-80-3	FV	S355J2H	80,00	120,00	0,67	3,00	26,67	6,00	44,25	27,86
14	150-150-5	F	S355J2H	150,00	150,00	1,00	5,00	30,00	10,00	31,96	31,96
17	200-200-8	F	S355J2H	200,00	200,00	1,00	8,00	25,00	20,00	24,58	24,58
18	100-100-6	F	S355J2H	100,00	100,00	1,00	6,00	16,67	12,00	15,57	15,57
19	250-150-5	FV	S355J2H	150,00	250,00	0,60	5,00	30,00	10,00	56,54	31,96
AA-21	200x100x4	FV	S355J2H	100,00	200,00	0,50	4,00	25,00	8,00	56,54	25,81
AE-22	200x100x8	FV	S355J0H	100,00	200,00	0,50	8,00	12,50	16,00	25,81	10,45
R-23	150x100x3	F	S355J2H	150,00	100,00	1,50	3,00	50,00	6,00	36,05	56,54
V-24	150x100x4	FV	S355J2H	100,00	150,00	0,67	4,00	25,00	8,00	41,17	25,81
Z-25	200x100x4	F	S355J2H	200,00	100,00	2,00	4,00	50,00	8,00	25,81	56,54
AV-26	70x70x3	F	S355J2H	70,00	70,00	1,00	3,00	23,33	6,00	23,76	23,76
BI-27	100x100x4	F	S355J2H	100,00	100,00	1,00	4,00	25,00	8,00	25,81	25,81
BH-28	100x100x5	F	S355J2H	100,00	100,00	1,00	5,00	20,00	10,00	19,67	19,67
AZ-29	70x70x5	F	S355J2H	70,00	70,00	1,00	5,00	14,00	10,00	12,29	12,29
BD-30	200x100x4	F	S275JRH	200,00	100,00	2,00	4,00	50,00	8,00	22,72	49,76
BC-31	200x100x4	F	S275JRH	200,00	100,00	2,00	4,00	50,00	8,00	22,72	49,76
BF-32	120x60x6	FV	S355J0H	60,00	120,00	0,50	6,00	10,00	12,00	19,67	7,37
BL-33	120x60x6	F	S355J0H	120,00	60,00	2,00	6,00	20,00	12,00	7,37	19,67
AT-35	100x100x8	F	S355J2H	100,00	100,00	1,00	8,00	12,50	16,00	10,45	10,45
AS-36	100x100x8	F	S355J2H	100,00	100,00	1,00	8,00	12,50	16,00	10,45	10,45
AU-37	100x100x8	F	S355J2H	100,00	100,00	1,00	8,00	12,50	16,00	10,45	10,45
BA-38	80x80x5	F	S235JRH	80,00	80,00	1,00	5,00	16,00	10,00	12,00	12,00
BB-39	80x80x5	F	S235JRH	80,00	80,00	1,00	5,00	16,00	10,00	12,00	12,00
BE-40	200x100x8	F	S355J0H	200,00	100,00	2,00	8,00	25,00	16,00	10,45	25,81

**Tab. 5.1** Valori nominali delle caratteristiche generali dei profili CFRHS testati prima della presente tesi

TEST	Profilo	F/FV	Materiale	b (mm)	h (mm)	b/h	t(mm)	b/t	re (mm)	$\lambda_w$ (mm)	$\lambda_f$ (mm)
2	100-100-8	F	S355J0H	100,00	100,00	1,00	8,00	12,50	16,00	10,45	10,45
15	150-150-5	F	S355J2H	150,00	150,00	1,00	5,00	30,00	10,00	31,96	31,96
16	150-150-5	F	S355J2H	150,00	150,00	1,00	5,00	30,00	10,00	31,96	31,96
20	250-150-5	FV	S355J2H	150,00	250,00	0,60	5,00	30,00	10,00	56,54	31,96
AR-34	100x100x8	F	S355J2H	100,00	100,00	1,00	8,00	12,50	12,00	11,68	11,68

**Tab. 5.2** Valori nominali delle caratteristiche generali dei profili HFRHS testati prima della presente tesi

TEST	Profilo	F/FV	Materiale	b (mm)	h (mm)	b/h	t(mm)	b/t	re (mm)	$\lambda_w$ (mm)	$\lambda_f$ (mm)
1	200-200-7	F	S355JOH	200,00	200,20	1,00	6,95	28,78	14,20	30,38	30,35
3	100-100-8	F	S355JOH	100,00	100,10	1,00	7,90	12,66	16,20	10,53	10,52
4	200-100-12.5	FV	S355J2H	100,20	200,10	0,50	12,60	7,95	38,60	11,99	2,24
5	100-100-10	F	S355J2H	100,10	100,30	1,00	10,20	9,81	21,20	6,98	6,95
6	300-200-8	FV	S355J2H	200,10	300,00	0,67	7,95	25,17	16,80	41,19	25,74
7	300-200-8	FV	S355J2H	200,10	300,10	0,67	8,00	25,01	16,70	40,97	25,61
8	400-200-8	FV	S355J2H	200,00	400,10	0,50	7,90	25,32	16,80	57,02	25,89
9	200-100-4	FV	S355J2H	100,20	200,00	0,50	4,00	25,05	8,20	56,41	25,75
10	120-60-6	FV	S355J2H	60,00	120,20	0,50	5,70	10,53	11,90	20,79	7,81
11	120-80-3	FV	S355J2H	80,10	120,10	0,67	3,00	26,70	6,30	44,04	27,65
12	120-80-3	FV	S355J2H	80,00	120,10	0,67	3,00	26,67	6,35	44,00	27,57
13	120-80-3	FV	S355J2H	80,00	120,20	0,67	3,00	26,67	6,35	44,04	27,57
14	150-150-5	F	S355J2H	150,10	150,10	1,00	4,75	31,60	10,80	33,25	33,25
17	200-200-8	F	S355J2H	200,00	200,20	1,00	8,05	24,84	16,70	25,47	25,44
18	100-100-6	F	S355J2H	100,20	100,30	1,00	5,90	16,98	16,70	13,94	13,92
19	250-150-5	FV	S355J2H	150,00	250,20	0,60	4,90	30,61	10,80	57,34	32,21
AA-21	200x100x4	FV	S355J2H	100,64	200,45	0,50	4,07	24,73	7,64	55,92	25,78
AE-22	200x100x8	FV	S355JOH	100,09	199,14	0,50	7,94	12,61	10,46	27,59	12,26
R-23	150x100x3	F	S355J2H	149,98	100,33	1,49	3,09	48,54	5,99	35,14	54,89
V-24	150x100x4	FV	S355J2H	100,68	149,91	0,67	4,11	24,50	7,91	40,10	25,38
Z-25	200x100x4	F	S355J2H	201,22	100,25	2,01	4,07	49,44	7,90	25,50	55,99
AV-26	70x70x3	F	S355J2H	70,08	69,94	1,00	3,03	23,13	6,28	23,28	23,33
BI-27	100x100x4	F	S355J2H	100,31	99,95	1,00	4,01	25,01	7,96	25,76	25,87
BH-28	100x100x5	F	S355J2H	100,47	99,92	1,01	4,94	20,34	10,04	19,86	20,00
AZ-29	70x70x5	F	S355J2H	69,99	70,13	1,00	5,02	13,94	9,89	12,33	12,29
BD-30	200x100x4	F	S275JRH	200,22	99,67	2,01	3,98	50,31	6,13	23,76	51,09
BC-31	200x100x4	F	S275JRH	199,89	100,44	1,99	4,01	49,85	6,85	23,40	50,23
BF-32	120x60x6	FV	S355JOH	60,25	119,82	0,50	5,77	10,44	7,93	22,14	9,46
BL-33	120x60x6	F	S355JOH	120,04	60,77	1,98	6,10	19,68	8,01	9,02	20,96
AT-35	100x100x8	F	S355J2H	100,11	100,22	1,00	7,85	12,75	13,26	11,54	11,52
AS-36	100x100x8	F	S355J2H	100,42	100,09	1,00	8,01	12,54	13,34	11,26	11,31
AU-37	100x100x8	F	S355J2H	100,50	100,32	1,00	8,02	12,53	13,66	11,19	11,21
BA-38	80x80x5	F	S235JRH	80,58	79,85	1,01	4,96	16,25	7,96	12,89	13,04
BB-39	80x80x5	F	S235JRH	80,06	79,72	1,00	4,99	16,04	6,12	13,52	13,59
BE-40	200x100x8	F	S355JOH	199,59	100,12	1,99	7,77	25,69	10,49	12,52	28,25

**Tab. 5.3** Valori misurati delle caratteristiche generali dei profili CFRHS testati prima della presente tesi

TEST	Profilo	F/FV	Materiale	b (mm)	h (mm)	b/h	t(mm)	b/t	re (mm)	$\lambda_w$ (mm)	$\lambda_f$ (mm)
2	100-100-8	F	S355J0H	100,30	100,20	1,00	8,05	12,46	15,60	10,53	10,55
15	150-150-5	F	S355J2H	150,20	150,10	1,00	5,00	30,04	10,60	31,69	31,71
16	150-150-5	F	S355J2H	150,00	150,20	1,00	4,90	30,61	10,50	32,41	32,36
20	250-150-5	FV	S355J2H	150,20	250,10	0,60	5,20	28,88	10,90	53,96	30,35
AR-34	100x100x8	F	S355J2H	100,32	99,93	1,00	8,02	12,51	10,42	12,12	12,18

**Tab. 5.4** Valori misurati delle caratteristiche generali dei profili HFRHS testati prima della presente tesi



TEST	Profilo	F/FV	Materiale	b (mm)	h (mm)	b/h	t(mm)	b/t	re (mm)	$\lambda_w$ (mm)	$\lambda_f$ (mm)
44-D	150x150x5	F	S355 J2H	150,00	150,00	1,00	5,00	30,00	10,00	31,96	31,96
45-E	150x150x5	F	S355 J2H	150,00	150,00	1,00	5,00	30,00	10,00	31,96	31,96
46-F	150x150x5	F	S355 J2H	150,00	150,00	1,00	5,00	30,00	10,00	31,96	31,96
50-L	200x200x8	F	S355 J2H	200,00	200,00	1,00	8,00	25,00	16,00	25,81	25,81
51-M	200x200x8	F	S355 J2H	200,00	200,00	1,00	8,00	25,00	16,00	25,81	25,81
53-O	50x50x6	F	S355 J2H	50,00	50,00	1,00	6,00	8,33	12,00	5,33	5,33
56-S	150x100x3	F	S355 J2H	150,00	100,00	0,67	3,00	33,33	6,00	56,54	36,05
57-T	150x100x4	F	S355 J2H	150,00	100,00	1,50	4,00	37,50	8,00	25,81	41,17
58-U	150x100x4	F	S355 J2H	150,00	100,00	1,50	4,00	37,50	8,00	25,81	41,17
62-AF	200x100x12.5	F	S355 J2H	200,00	100,00	2,00	12,50	16,00	37,50	2,46	12,29
63-AG	200x100x12.5	F	S355 J2H	200,00	100,00	0,50	12,50	8,00	37,50	12,29	2,46
64-AH	250x150x5	F	S275 JOH	250,00	150,00	1,67	5,00	50,00	10,00	28,13	49,76
65-AI	250x150x5	F	S275 JOH	250,00	150,00	0,60	5,00	30,00	10,00	49,76	28,13
66-AL	250x150x5	FV	S355 J2H	150,00	250,00	1,67	5,00	50,00	10,00	31,96	56,54
67-AM	250x150x5	FV	S355 J2H	150,00	250,00	0,60	5,00	30,00	10,00	56,54	31,96
68-AN	300x200x8	F	S355 J2H	300,00	200,00	1,50	8,00	37,50	16,00	25,81	41,17
69-AO	400x200x8	F	S355 J2H	400,00	200,00	2,00	8,00	50,00	16,00	25,81	56,54
70-AP	400x200x8	F	S355 J2H	400,00	200,00	2,00	8,00	50,00	16,00	25,81	56,54
71-AQ	100x100x3	F	S355 J2H	100,00	100,00	1,00	3,00	33,33	6,00	36,05	36,05

**Tab. 5.5** Valori nominali delle caratteristiche generali dei profili CFRHS testati durante la presente tesi

TEST	Profilo	F/FV	Materiale	b (mm)	h (mm)	b/h	t(mm)	b/t	re (mm)	$\lambda_w$ (mm)	$\lambda_f$ (mm)
A	100x100x8	F	S355	100,00	100,00	1,00	8,00	12,50	16,00	10,45	10,45
B	100x100x8	F	S355	100,00	100,00	1,00	8,00	12,50	16,00	10,45	10,45
C	100x100x8	F	S355	100,00	100,00	1,00	8,00	12,50	16,00	10,45	10,45
G	150x150x12	F	S355 J2H	150,00	150,00	1,00	12,00	12,50	36,00	7,99	7,99
H	150x150x12	F	S355 J2H	150,00	150,00	1,00	12,00	12,50	36,00	7,99	7,99
I	150x150x12	F	S355 J2H	150,00	150,00	1,00	12,00	12,50	36,00	7,99	7,99
N	50x50x3	F	S235 JRH	50,00	50,00	1,00	3,00	16,67	6,00	12,67	12,67
P	80x80x5	F	S235 JRH	80,00	80,00	1,00	5,00	16,00	10,00	12,00	12,00
Q	120x80x6	F	S355 JOH	120,00	80,00	1,50	6,00	20,00	12,00	11,47	19,67
AB	200x100x4	F	S275 JR	200,00	100,00	2,00	4,00	50,00	8,00	22,72	49,76
AC	200x100x8	F	S355 JOH	200,00	100,00	2,00	8,00	25,00	16,00	10,45	25,81
AD	200x100x8	F	S355 JOH	200,00	100,00	2,00	8,00	25,00	16,00	10,45	25,81

**Tab. 5.6** Valori nominali delle caratteristiche generali dei profili HFRHS testati durante la presente tesi

TEST	Profilo	F/FV	Materiale	b (mm)	h (mm)	b/h	t(mm)	b/t	re (mm)	$\lambda_w$ (mm)	$\lambda_f$ (mm)
44-D	150x150x5	F	S355 J2H	149,47	149,42	1,00	4,68	31,94	8,32	34,87	34,88
45-E	150x150x5	F	S355 J2H	149,50	149,76	1,00	4,86	30,76	7,95	33,85	33,79
46-F	150x150x5	F	S355 J2H	150,85	149,86	1,01	4,88	30,91	5,87	34,79	35,04
50-L	200x200x8	F	S355 J2H	199,90	199,42	1,00	7,80	25,63	16,94	26,08	26,16
51-M	200x200x8	F	S355 J2H	200,10	199,22	1,00	8,00	25,01	16,73	25,47	25,60
53-O	50x50x6	F	S355 J2H	49,82	49,98	1,00	5,00	9,96	8,81	7,95	7,92
56-S	150x100x3	F	S355 J2H	150,44	100,40	1,50	3,14	47,91	5,94	34,65	54,24
57-T	150x100x4	F	S355 J2H	150,04	99,97	1,50	4,40	34,10	6,95	24,04	38,03
58-U	150x100x4	F	S355 J2H	150,05	100,03	1,50	4,00	37,51	9,53	24,88	40,25
62-AF	200x100x12.5	F	S355 J2H	200,76	100,62	2,00	12,86	15,61	31,70	3,56	13,13
63-AG	200x100x12.5	F	S355 J2H	200,54	100,44	2,00	12,76	15,72	34,11	3,10	12,75
64-AH	250x150x5	F	S275 JOH	252,00	149,54	1,69	5,10	49,41	9,70	27,60	49,34
65-AI	250x150x5	F	S275 JOH	281,85	149,83	1,88	5,34	52,78	11,43	25,72	52,47
66-AL	250x150x5	FV	S355 J2H	151,00	250,00	0,60	4,68	32,26	9,53	60,65	34,65
67-AM	250x150x5	FV	S355 J2H	149,92	251,00	0,60	4,60	32,59	9,10	62,20	35,19
68-AN	300x200x8	F	S355 J2H	301,15	200,50	1,50	7,86	38,31	19,32	25,31	41,05
69-AO	400x200x8	F	S355 J2H	401,00	201,00	2,00	7,82	51,28	23,00	24,36	55,80
70-AP	400x200x8	F	S355 J2H	400,00	206,00	1,94	8,20	48,78	23,50	23,83	52,91
71-AQ	100x100x3	F	S355 J2H	100,70	99,25	1,01	2,93	34,37	5,91	36,68	37,28

**Tab. 5.7** Valori misurati delle caratteristiche generali dei profili CFRHS testati durante la presente tesi

TEST	Profilo	F/FV	Materiale	b (mm)	h (mm)	b/h	t(mm)	b/t	re (mm)	$\lambda_w$ (mm)	$\lambda_f$ (mm)
A	100x100x8	F	S355	100,30	100,04	1,00	7,80	12,86	11,97	11,99	12,03
B	100x100x8	F	S355	100,14	100,20	1,00	7,80	12,84	11,42	12,19	12,18
C	100x100x8	F	S355	99,80	99,50	1,00	7,58	13,17	10,90	12,60	12,65
G	150x150x12	F	S355 J2H	150,65	149,90	1,01	12,05	12,50	21,31	10,94	11,02
H	150x150x12	F	S355 J2H	150,30	149,73	1,00	12,01	12,51	20,93	11,04	11,10
I	150x150x12	F	S355 J2H	150,58	149,90	1,00	11,98	12,57	21,63	10,94	11,01
N	50x50x3	F	S235 JRH	49,20	49,56	0,99	3,14	15,67	4,29	13,05	12,94
P	80x80x5	F	S235 JRH	80,20	80,42	1,00	4,70	17,06	8,12	13,66	13,61
Q	120x80x6	F	S355 JOH	119,70	79,22	1,51	5,54	21,61	8,23	13,92	22,90
AB	200x100x4	F	S275 JR	199,96	99,58	2,01	3,84	52,07	7,98	23,56	51,83
AC	200x100x8	F	S355 JOH	199,60	99,70	2,00	7,74	25,79	9,74	12,74	28,60
AD	200x100x8	F	S355 JOH	199,64	100,18	1,99	7,92	25,21	11,39	12,01	27,45

**Tab. 5.8** Valori misurati delle caratteristiche generali dei profili HFRHS testati durante la presente tesi

### 5.3 Misurazione dei profili

La prima operazione eseguita in laboratorio è stata la misurazione delle dimensioni del profilo; l'obiettivo è quello di considerare le reali caratteristiche geometriche, di resistenza, gli eventuali difetti e le loro conseguenze sulla prova sperimentale e sulla modellazione agli elementi finiti.

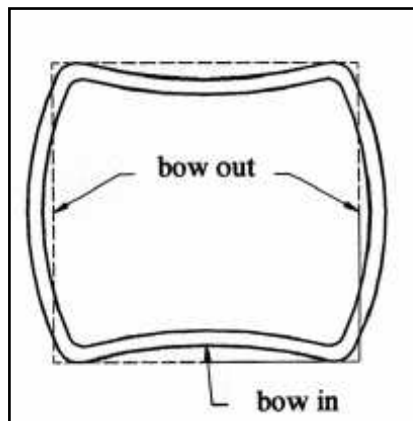
Le misurazioni hanno riguardato le dimensioni della sezione trasversale e le imperfezioni superficiali relative alla flangia superiore, definita dalla posizione durante la prova di carico.

Le misure reali della sezione del profilo, determinate mediante calibro centesimale sono state riportate nelle tabelle del precedente paragrafo.

I profili RHS non sono perfettamente rettangolari, il processo di formazione, la saldatura, le lavorazioni ed altri fattori possono introdurre imperfezioni geometriche. Le imperfezioni locali possono influenzare la capacità di rotazione ed il momento massimo raggiungibile (Key e Hancock, 1993), proprio per questo sono state misurate e considerate come parte della prova.

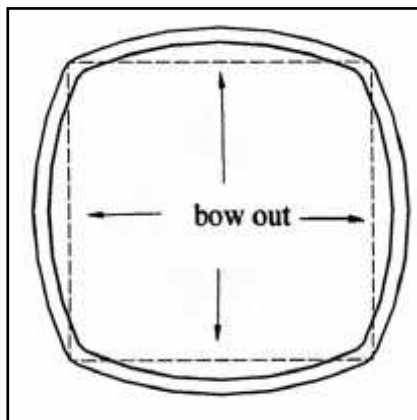
Le misurazioni, eseguite mediante spessimetro capace di apprezzare un'imperfezione di 0,05mm, consistono nel misurare una differenza di quota tra punti della flangia compressa, appartenenti alla stessa sezione trasversale.

La maggior parte dei profili RHS testati in precedenza allo svolgimento della presente tesi (test dal n°1 al n°40) presentava un "bow-out" sulle anime seguito, per motivi di congruenza, da un "bow-in" sulle flange, relativamente costante sulla lunghezza del profilo fig. 5.4.



**Fig. 5.4** Imperfezione di tipo "bow-out" – "bow-in"

Alcuni RHS presentavano invece un “bow-out” su tutti gli elementi piani costituenti il profilo fig. 5.5.



**Fig. 5.5** Imperfezione di tipo “bow-out”

I risultati di questi primi 40 profili, compiute in corrispondenza di sezioni poste ad interasse di 150mm, sono state riportate nelle Tabelle 5.9 e 5.10.

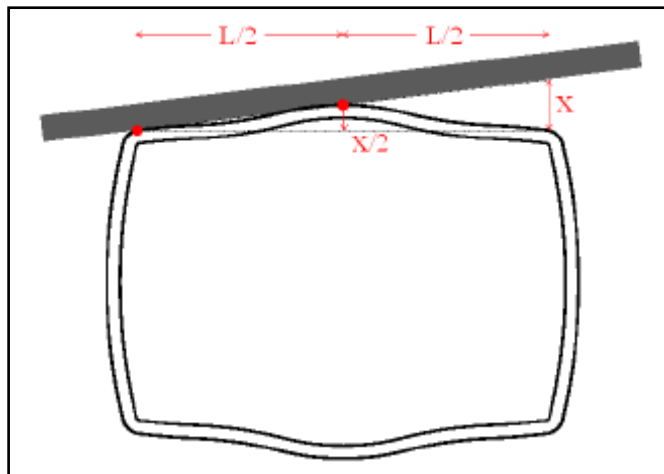
Per i test dal n°1 al n°20 le imperfezioni sono state misurate a partire dalla posizione del carico e procedendo verso l'esterno, per i test dal n°21 al n°40 lo zero è posizionato in mezzzeria.

Per la maggior parte dei profili provati durante la presente tesi (test dal n°41 al n°71) si sono riscontrate imperfezioni della flangia superiore di tipo “bow-in”; solo i profili di dimensioni maggiori hanno presentato una convessità verso l'esterno, più difficilmente quantificabile. Infatti, mentre per il primo tipo di imperfezione la determinazione della freccia è immediata, per la seconda il problema è più complesso.

Per la misurazione dell'imperfezione di tipo “bow-out” si è fatto ricorso alle seguenti osservazioni:

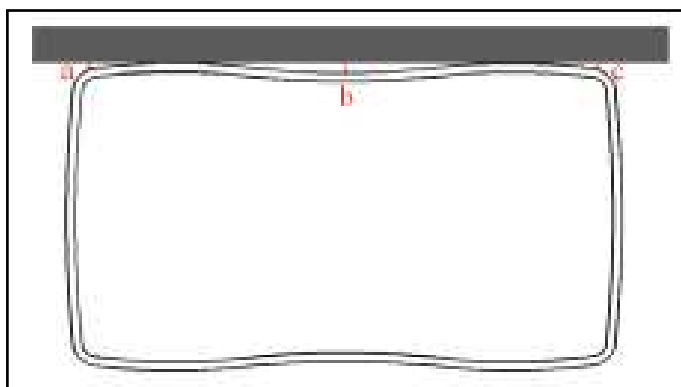
- ✓ la massima altezza dell'imperfezione (convessità) è localizzata in prossimità della mezzeria della flangia;
- ✓ non avendo a disposizione una livella in grado di materializzare un'asse orizzontale è stato possibile misurare direttamente le imperfezioni alle estremità e quindi la freccia in mezzeria;
- ✓ la conformazione di tutti i profili, con imperfezione di tipo “bow-out”, era tale che si potesse appoggiare un piatto rettilineo sulla flangia, in maniera che toccasse soltanto ad un'estremità (angolo) e sulla mezzeria.

Sulla base di quanto detto, si è ritenuto che la freccia in mezzeria potesse essere quantificata nella misura di un mezzo dell'altezza “x”, misurata tra l'angolo del profilo ed il prolungamento del piatto fig. 5.6.

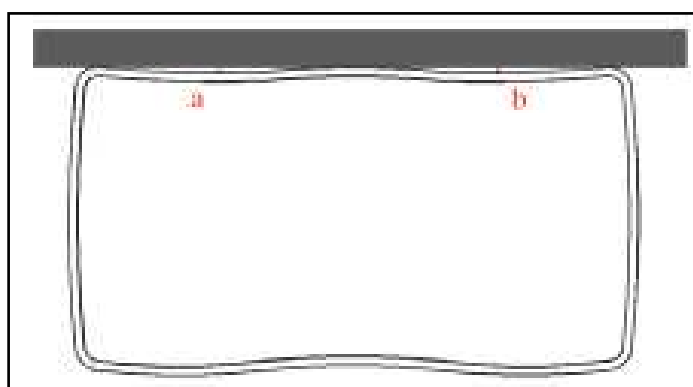


**Fig. 5.6** Misurazione delle imperfezioni di tipo “bow-out”

Per i profili con sezione molto grande (400x200x8, 300x200x8) si è riscontrato un'imperfezione della flangia superiore con duplice "gobba", verso l'interno o verso l'esterno; per questi profili stato necessario misurare le imperfezioni in punti intermedi della flangia, così come indicato nelle figure 5.7 e 5.8.



**Fig. 5.7** Misurazione delle imperfezioni del profilo 400x200x8



**Fig. 5.8** Misurazione delle imperfezioni del profilo 300x200x8

Le Tabelle 5.11 e 5.12, di seguito riportate contengono i valori misurati delle imperfezioni superficiali della flangia superiore per tutti i profili testati nell'ambito della presente tesi. Le misurazioni sono state effettuate ad interasse di 200mm; il punto di ascissa zero corrisponde alla mezzeria del profilo.



## **5.4 Descrizione delle prove**

### **5.4.1 Definizione preliminare della prova**

Studi precedenti allo svolgimento di questa tesi si sono occupati di definire la modalità di esecuzione della prova in modo da conseguire valori dei risultati, ricavabili dai test sperimentali, che fossero influenzati il meno possibile da fattori intrinseci alla prova stessa.

Al fine di ottenere una zona centrale del profilo impegnata a momento costante e taglio nullo, lo schema di carico adottato è quello della prova di flessione su quattro punti mostrato in fig. 5.9.

La preparazione dei test e la modalità di introduzione del carico sono state studiate attraverso delle simulazioni con modelli agli elementi finiti.

I parametri che sono stati considerati sono:

- ✓ influenza delle proprietà del materiale;
- ✓ modalità di introduzione del carico;
- ✓ influenza dei vincoli laterali;
- ✓ influenza del tipo di carico sulla rotazione disponibile;
- ✓ influenza della snellezza delle flange e del rapporto di forma;
- ✓ lunghezza del profilo.

Per chiarezza di seguito è stato descritto sinteticamente ciascuno degli aspetti sopra citati. Per chi fosse interessato ad un approfondimento si rimanda alla consultazione delle tesi di Paolo Sarti, “Duttilità e capacità di rotazione dei profili tubolari”, e Andrea Pipino, “Influenza delle caratteristiche meccaniche del materiale sulla capacità di rotazione di sezioni tubolari metalliche”.

#### *Influenza delle proprietà del materiale*

È stata eseguita un'analisi per studiare come il comportamento strutturale e la capacità di rotazione dei profili RHS sono influenzate dalle variazioni delle proprietà meccaniche dell'acciaio lungo il perimetro della sezione e della forma stessa della curva tensione-deformazione.

Tali studi hanno evidenziato che la curva momento-rotazione è poco influenzata dalle variazioni delle proprietà meccaniche lungo la sezione e che quest'ultima può essere molto ben rappresentata utilizzando i valori medi; i risultati sono invece molto sensibili alla forma della curva tensione-deformazione dell'acciaio.

#### *Modalità di introduzione del carico*

La modalità di introduzione del carico è stata studiata cercando di minimizzare i disturbi locali. La soluzione adottata è quella di trasferire il carico direttamente all'anima attraverso un adeguato irrigidimento saldato all'anima stessa.

Questo metodo di introduzione del carico attraverso "piatti paralleli" è stato impiegato anche in prove precedenti condotte da Hasan e Hancock nel 1988 e da Zhao e Hancock nel 1991.

#### *Influenza dei vincoli laterali*

È stata accertata l'influenza, sulla capacità di deformazione, della presenza e dell'interasse di ritegni trasversali della flangia compressa, in prossimità della zona interessata dal formarsi della cerniera plastica. I risultati hanno evidenziato che i profili cavi rettangolari formati a freddo hanno un'elevata capacità torsionale e, di conseguenza, una grande stabilità laterale; questo permette che durante la prova non si verifichi alcun fenomeno di instabilità laterale e che sia il momento plastico sia la capacità rotazionale non siano influenzati significativamente dalla presenza e dall'interasse dei vincoli laterali.

#### *Influenza del tipo di carico sulla rotazione disponibile*

Durante la prova di carico si possono individuare tre tipi di deformazione:

1. Deformazione elastica: distribuita lungo l'intera campata della trave.
2. Deformazione plastica distribuita: sviluppata in modo uniforme lungo la zona a momento costante.
3. Deformazione plastica localizzata: concentrata nella cerniera plastica.

La rotazione plastica disponibile  $\varphi_{av}$ , come viene misurata nella prova di flessione su quattro punti, comprende sia la componente distribuita lungo la zona centrale, a momento costante, sia quella concentrata nella zona della cerniera plastica; la prima però non può essere considerata come un parametro caratteristico della sezione in quanto dipende dalla distanza tra i carichi.

La prova è stata perciò progettata in maniera tale che la distanza tra i carichi non sia molto maggiore della dimensione prevista della cerniera; in questo modo il contributo della parte distribuita della deformazione può essere considerato minimo.

#### *Influenza della snellezza delle flange e del rapporto di forma*

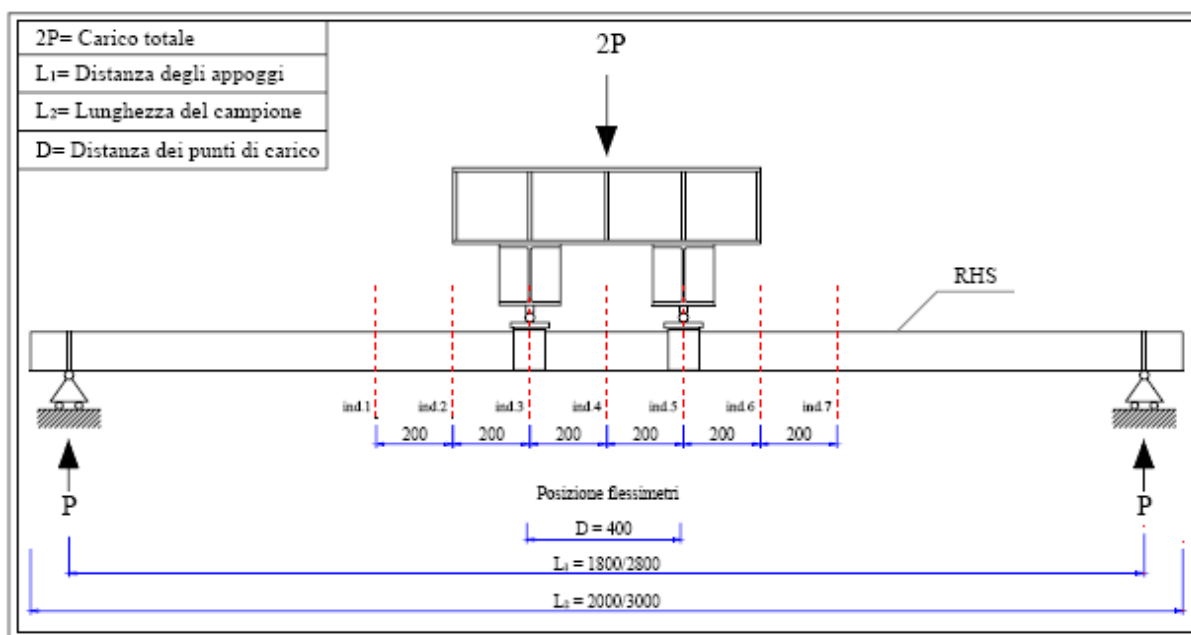
Si è studiata l'influenza delle snellezze dell'anima e della flangia sulla duttilità dei profili CFSHS; dai risultati si evince che il comportamento, in termini di curva momento-rotazione, sembra essere condizionato dall'instaurarsi dell'instabilità locale della flangia fino al raggiungimento del momento massimo; la parte discendente della curva è influenzata essenzialmente dalla snellezza dell'anima.

#### *Lunghezza del profilo*

Le lunghezze dei profili impiegati per la sperimentazione sono tali da non impegnare eccessivamente a taglio i profili stessi e, allo stesso tempo, da contenere gli abbassamenti in mezzzeria necessari al raggiungimento del momento massimo.

### **5.4.2 Modalità di esecuzione della prova**

Lo schema adottato è quello della prova a flessione su quattro punti il quale ha permesso, come detto in precedenza, di avere una zona centrale a momento costante e taglio nullo. Tale schema è riportato nella fig. 5.9 dove si è indicata anche l'individuazione della posizione degli induttivi.



**Fig. 5.9** Schema di carico con individuazione della posizione degli induttivi

Durante la prova il carico viene introdotto mediante un martinetto idraulico, capace di trasmettere una forza di 300tonn, che agisce direttamente su un traverso rigido in grado di ripartire in carico, fig. 5.10.



**Fig. 5.10** Traverso di ripartizione del carico

Il trasferimento dello sforzo all'elemento da provare avviene su due punti simmetrici, mediante l'utilizzo di piatti paralleli saldati alle anime del profilo stesso, fig. 5.11; il contrasto è costituito dalla macchina di prova “Mohr e Federhaff” rappresentata in fig. 5.12.

Le due piastre a contatto, l'una vincolata sulla trave e l'altra alla traversa di ripartizione del carico, sono state separate da fogli di Teflon, come si vede in fig. 6.10, in modo tale che il loro movimento reciproco, dovuto all'avvicinamento dei punti di applicazione del carico causato dalla curvatura del profilo durante la prova, non provochi l'insorgere di sforzi assiali apprezzabili.



**Fig. 5.11** Dispositivo di trasmissione del carico



**Fig. 5.12** Vista frontale della macchina di prova “Mohr - Federhaff”

i vincoli esterni sono di semplice appoggio in quanto i profili sono posizionati su elementi in acciaio dai quali sono separati da fogli di Teflon, come mostrato in fig. 5.13.



**Fig. 5.13** Vincoli esterni

Le prove sono state in controllo di spostamento attraverso l'impiego di flessimetri. Questi ultimi sono strumenti di misura capaci di convertire la variazione di distanza tra i loro estremi in una variazione di induttanza. Quelli impiegati nelle nostre prove raggiungono la precisione del millesimo di millimetro e sono serviti ad individuare l'andamento delle inflessioni, ovvero degli spostamenti verticali di alcuni punti del campione, in funzione del carico applicato. Quest'ultimo è stato misurato per mezzo di una cella di carico.

Il posizionamento dei trasduttori, è stato tale da averne uno sotto ciascun punto di applicazione del carico (n°3 e n°5) ed uno sotto la mezzera del profilo (n°4); gli altri induttivi sono stati posti ad interasse di 200mm, vedi fig. 5.9.

Al fine di far comprendere meglio lo svolgimento delle prove e l'attrezzatura utilizzata si sono riportate delle fotografie scattate in laboratorio durante la campagna sperimentale.

In particolare nella fig. 5.14 è rappresentata la collocazione dell'area di prova all'interno del laboratorio del Dipartimento, nella fig. 5.15 una vista generale della macchina di prova con le relative attrezzature ed infine, nelle figg. 5.16 e 5.17 sono riportate due immagini che mostrano un particolare della collocazione degli strumenti di misura.

Infine nella fig. 5.18 è riportata una sequenza di immagini relative a diverse fasi di esecuzione di un'intera prova di carico.





**Fig. 5.14** Collocazione dell'area di prova all'interno del laboratorio



**Fig. 5.15** Vista generale della macchina di prova e delle attrezzature



**Fig. 5.16** Particolare dei trasduttori e della loro collocazione



**Fig. 5.17** Particolare degli strumenti di misura in mezzzeria



**Fig. 5.18** Sequenza delle diverse fasi di esecuzione di una prova di carico



### 5.4.3 Metodo per il calcolo delle rotazioni

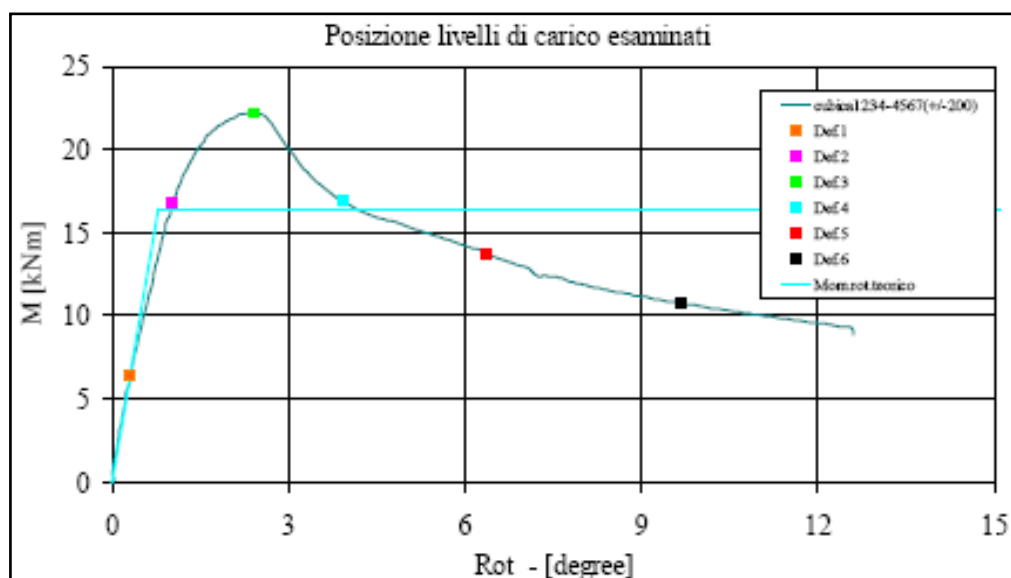
Per valutare le rotazioni della cerniera si ritiene che il metodo migliore sia quello che consiste nel misurare la rotazione relativa delle sezioni poste in corrispondenza del carico, ovvero in corrispondenza delle sezioni indicate come n°3 e n°5 nella fig. 5.9. in tal modo, poiché esse delimitano il tratto a momento costante, riusciamo a calcolare la rotazione plastica, depurata da quella elastica che si sviluppa nella zona all'esterno delle sezioni in questione.

La metodologia di calcolo considera l'effettiva rotazione nelle sezioni n°3 e n°5 come derivata della funzione che rappresenta l'andamento della linea d'asse del profilo durante la prova di carico.

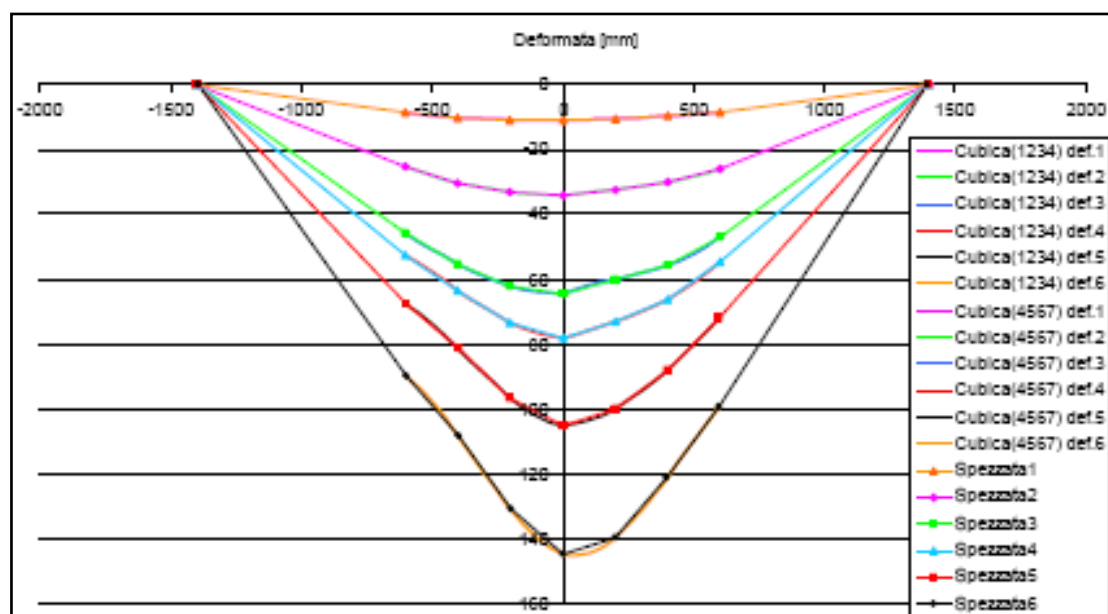
A tale scopo la deformata del profilo è stata approssimata dalla curva ottenuta dalla combinazione di due cubiche, la prima passante per i punti 1-2-3-4 e la seconda per i punti 4-5-6-7. Questa funzione è stata ritenuta la più soddisfacente sia dal punto di vista teorico sia da quello visivo, infatti, nei tratti esterni del profilo, l'andamento del momento è triangolare, per cui l'equazione della linea elastica è proprio una cubica. Ciò non è vero nel tratto centrale, tuttavia, dato che in questa regione si ha una localizzazione di deformazioni, occorre accontentarsi di una soluzione approssimata, la quale sia comunque in grado di rappresentare il comportamento reale.

Il punto 4, nella mezzeria del profilo, funge solamente da appoggio per il passaggio della cubica, dato che nel tratto esterno i punti considerati sono solo tre.

Nella fig. 5.19 è riportato il diagramma momento-rotazione con l'individuazione dei diversi livelli di carico esaminati; nella fig. 5.20 è invece riportato per ognuno dei livelli di cui sopra, l'andamento delle spezzate che uniscono i sette punti rappresentativi e le rispettive cubiche, una a destra e l'altra a sinistra. È da notare come nel tratto interno tali curve non siano raccordate.



**Fig. 5.19** Diagramma M-rot con individuazione dei livelli di carico esaminati



**Fig. 5.20** Andamento delle spezzate e delle cubiche per i livelli di carico esaminati

## **5.5 Schede riassuntive dei test**

I risultati sperimentali sono stati riassunti in termini di diagrammi momento – rotazione. Per ogni profilo provato è stata redatta una scheda contenente:

- ✓ Un prospetto in cui sono illustrate le dimensioni misurate del profilo (base, altezza, spessore, raggio di raccordo agli angoli) ed i parametri relativi al test effettuato.
- ✓ Alcune foto che illustrano il comportamento del profilo durante la prova.
- ✓ L'andamento delle spezzate, relative a sei livelli di carico, che uniscono i sette punti rappresentativi della deformata del profilo.
- ✓ Un grafico contenente la curva momento – rotazione sperimentale, su cui sono individuati i livelli di carico cui corrispondono le spezzate sopra menzionate; nello stesso grafico è riportata la curva teorica corrispondente all'idealizzazione bilineare del comportamento della cerniera plastica, riferita alla tensione di snervamento ed alle dimensioni nominali del profilo.
- ✓ Tipo di crisi (singola bozza sulla flangia compressa, bozza singola estesa sulla flangia compressa, completamente plastica).

Nelle pagine seguenti sono riportate le schede relative ai test identificati dal numero 41 al numero 71 effettuati durante la presente tesi.

Per la consultazione delle schede relative ai profili testati in precedenza (test dal n°1 al n°40) si rimanda alla lettura della tesi di Paolo Sarti, "Duttilità e capacità di rotazione di profili tubolari".

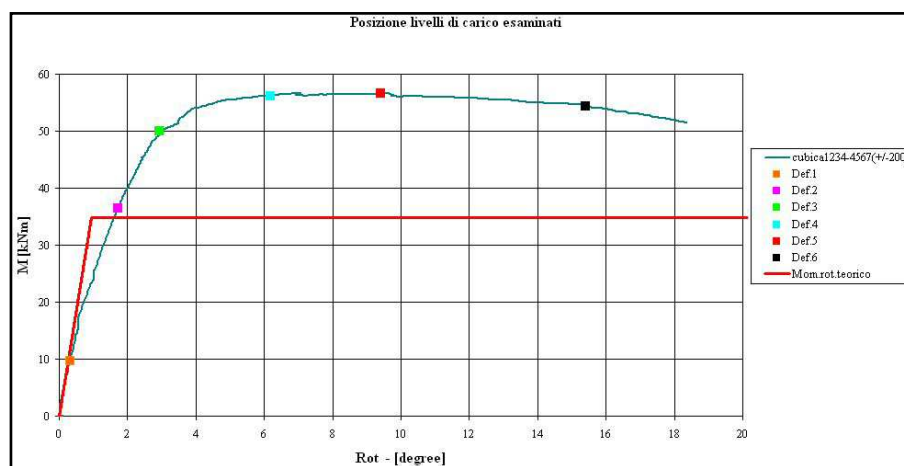
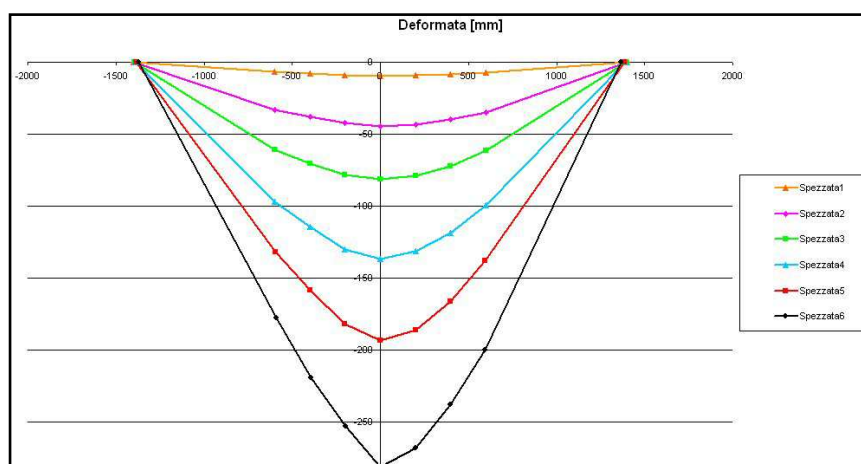
Test n°41 100x100x8 HFRH5 (\$355) A					
Valori misurati				Parametri del test	
B [mm]	H [mm]	t [mm]	R [mm]	Distanza appoggi [mm]	Distanza carichi [mm]
100,30	100,04	7,80	11,97	2800	400
<b>Modalità di crisi</b> : bozza singola estesa sulla flangia compressa					



Deformata del profilo al termine del test



Dettaglio della cerniera plastica al termine del test



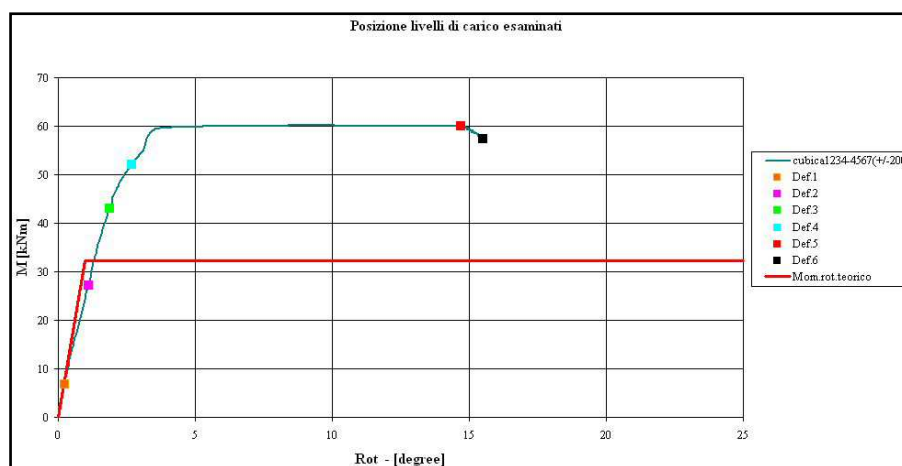
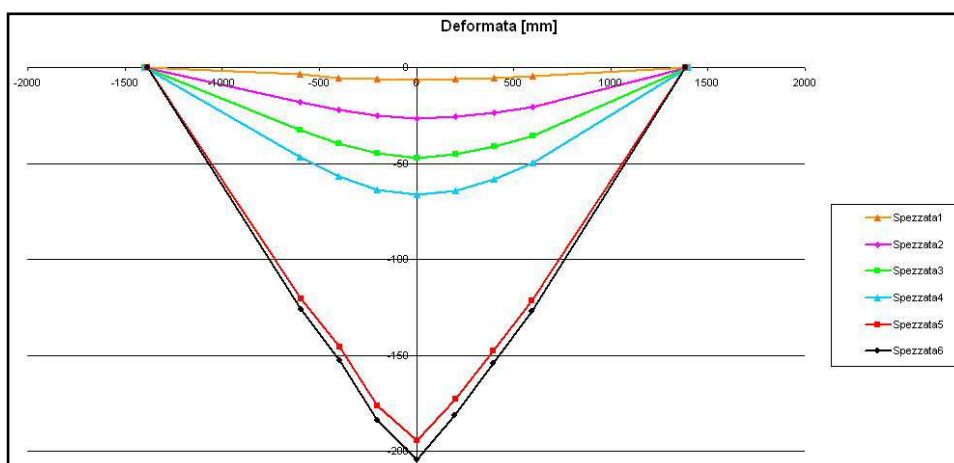
Test n°42 100x100x8 HFRH5 (\$355) A					
Valori misurati				Parametri del test	
B [mm]	H [mm]	t [mm]	R [mm]	Distanza appoggi [mm]	Distanza carichi [mm]
100,14	100,20	7,80	11,42	2800	400
<b>Modalità di crisi</b> : bozza singola estesa sulla flangia compressa					



Deformata del profilo al termine del test



Dettaglio della cerniera plastica al termine del test



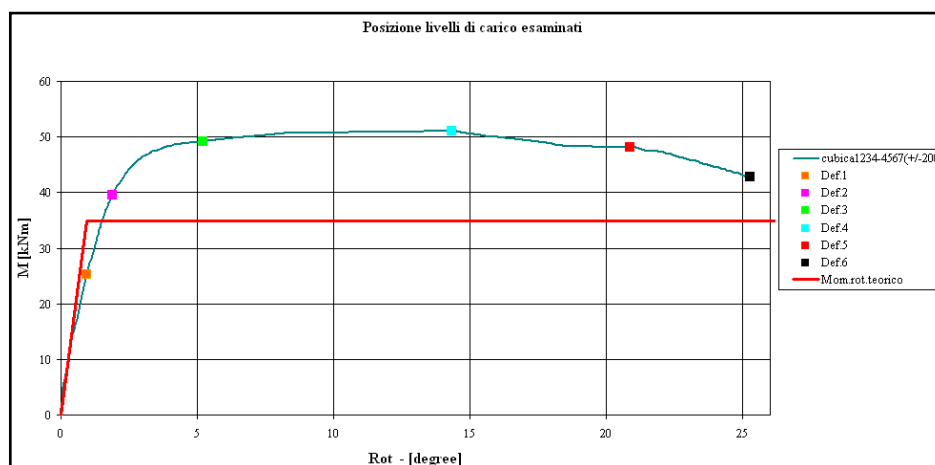
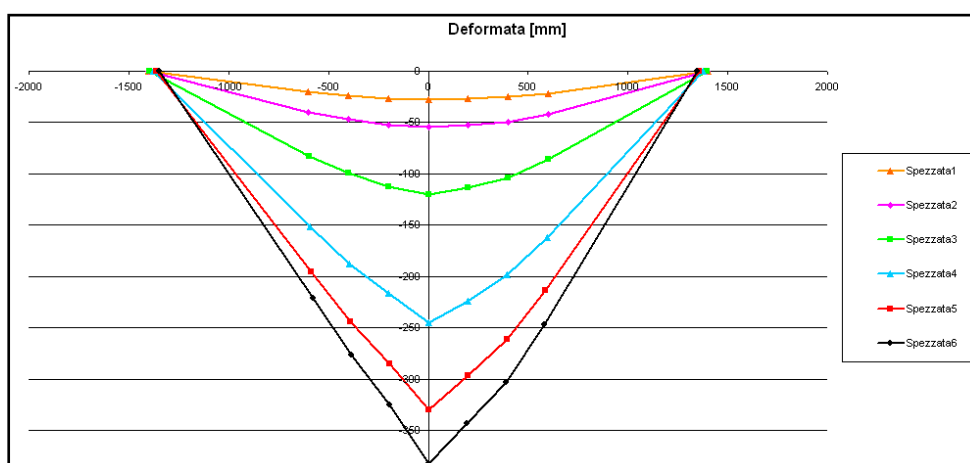
Test n°43 100x100x8 HFRH5 (\$355) C					
Valori misurati				Parametri del test	
B [mm]	H [mm]	t [mm]	R [mm]	Distanza appoggi [mm]	Distanza carichi [mm]
99,98	99,50	7,58	10,90	2800	400
<b>Modalità di crisi</b> : bozza singola estesa sulla flangia compressa					



Deformata del profilo al termine del test



Dettaglio della cerniera plastica al termine del test



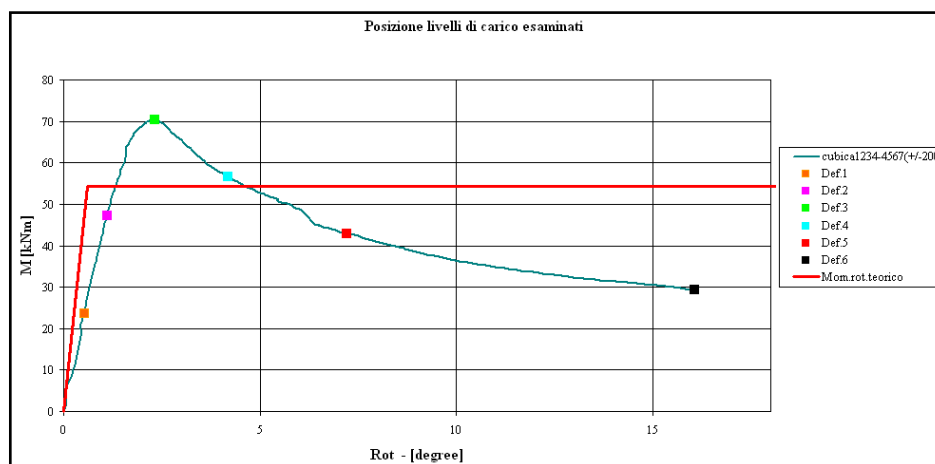
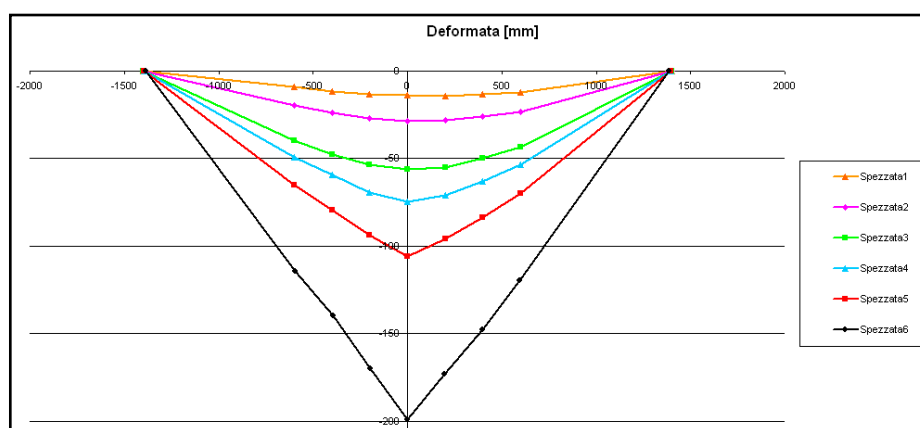
Test n°44 150x150x5 CFRH5 (\$355)2H) D					
Valori misurati				Parametri del test	
B [mm]	H [mm]	t [mm]	R [mm]	Distanza appoggi [mm]	Distanza carichi [mm]
149,42	149,42	4,68	7,95	2800	400
<b>Modalità di crisi</b> : bozza singola estesa sulla flangia compressa					



Deformata del profilo al termine del test



Dettaglio della cerniera plastica al termine del test

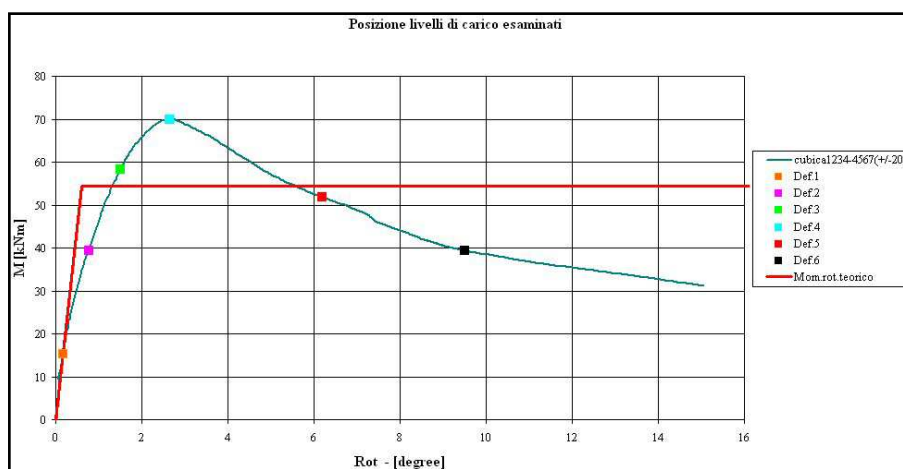
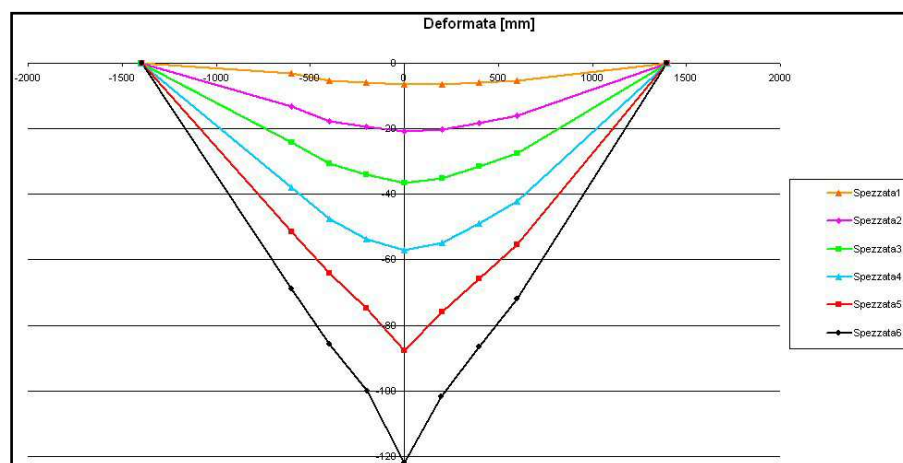




Test n°45 150x150x5 CFRH5 (\$355)2H) E					
Valori misurati				Parametri del test	
B [mm]	H [mm]	t [mm]	R [mm]	Distanza appoggi [mm]	Distanza carichi [mm]
149,50	149,76	4,86	7,95	2800	400
<b>Modalità di crisi</b> : bozza singola estesa sulla flangia compressa					



Deformata del profilo al termine del test  
Dettaglio della cerniera plastica al termine del test





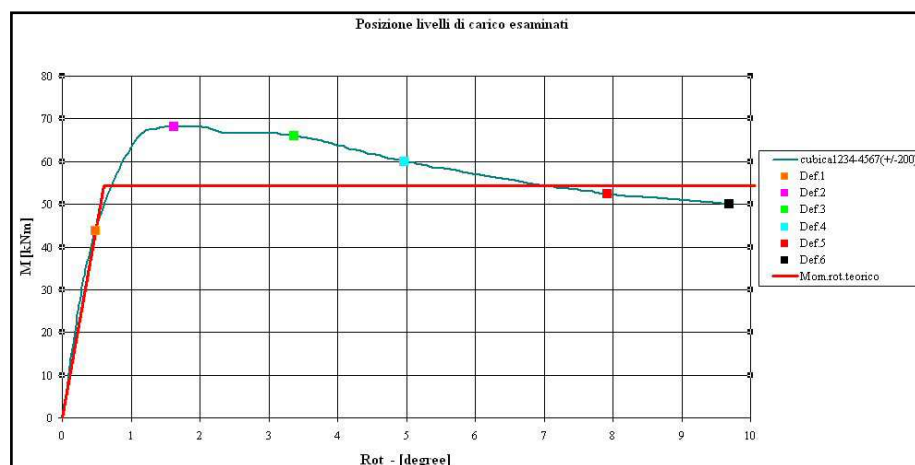
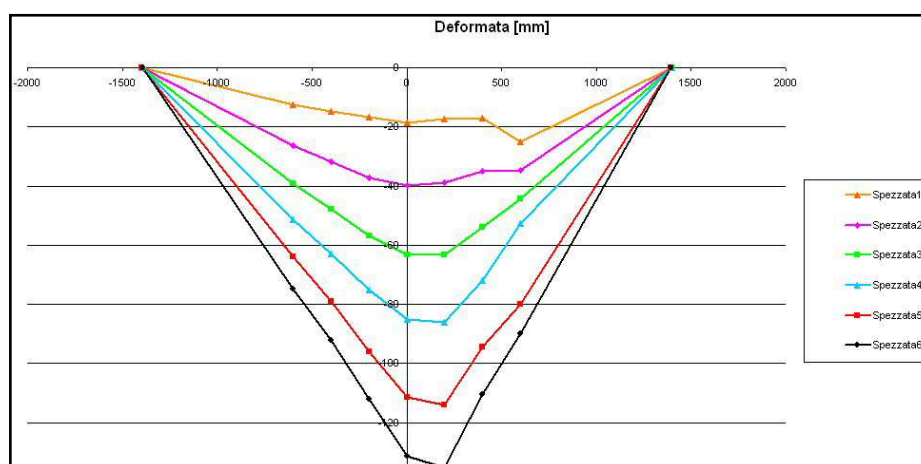
Test n°46 150x150x5 CFRH5 (\$355)2H) F					
Valori misurati				Parametri del test	
B [mm]	H [mm]	t [mm]	R [mm]	Distanza appoggi [mm]	Distanza carichi [mm]
150,85	149,86	4,88	5,87	2800	400
<b>Modalità di crisi</b> : bozza singola estesa sulla flangia compressa					



Deformata del profilo al termine del test



Dettaglio della cerniera plastica al termine del test



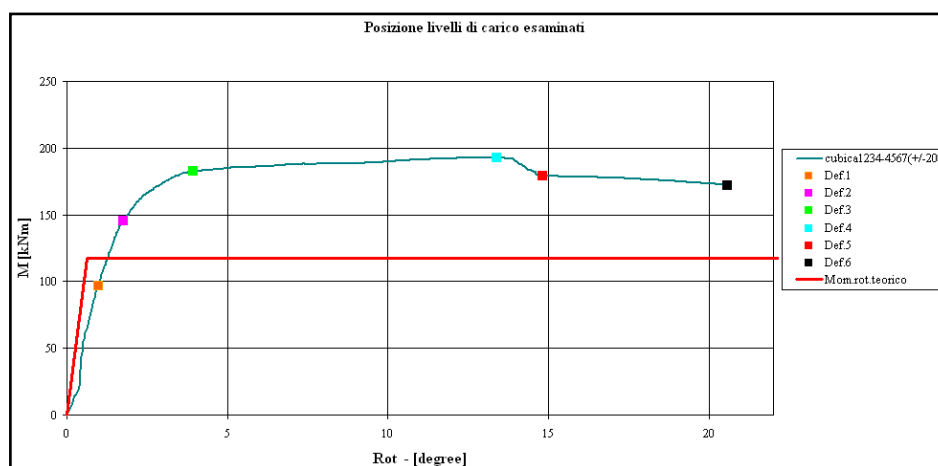
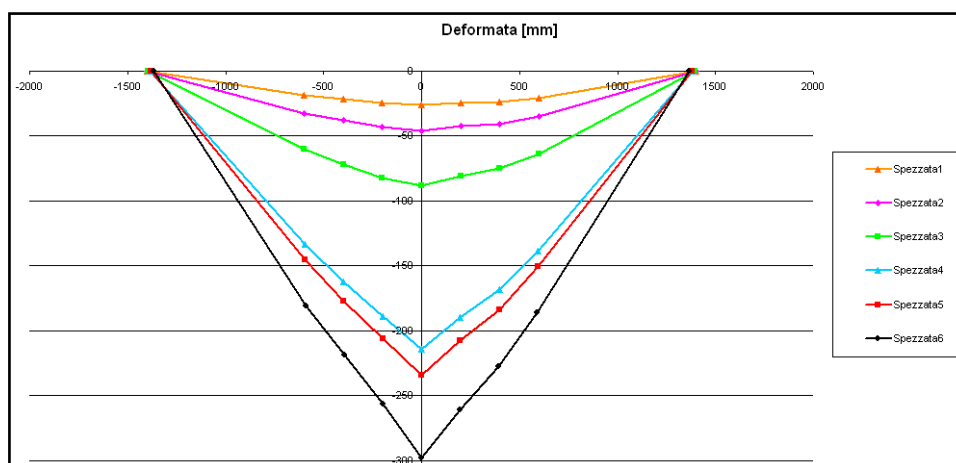
Test n°47 150x150x12 HFRH5 (S355)2H) G					
Valori misurati				Parametri del test	
B [mm]	H [mm]	t [mm]	R [mm]	Distanza appoggi [mm]	Distanza carichi [mm]
150,65	149,90	12,05	21,31	2800	400
<b>Modalità di crisi</b> : bozza singola estesa sulla flangia compressa					



Deformata del profilo al termine del test



Dettaglio della cerniera plastica al termine del test



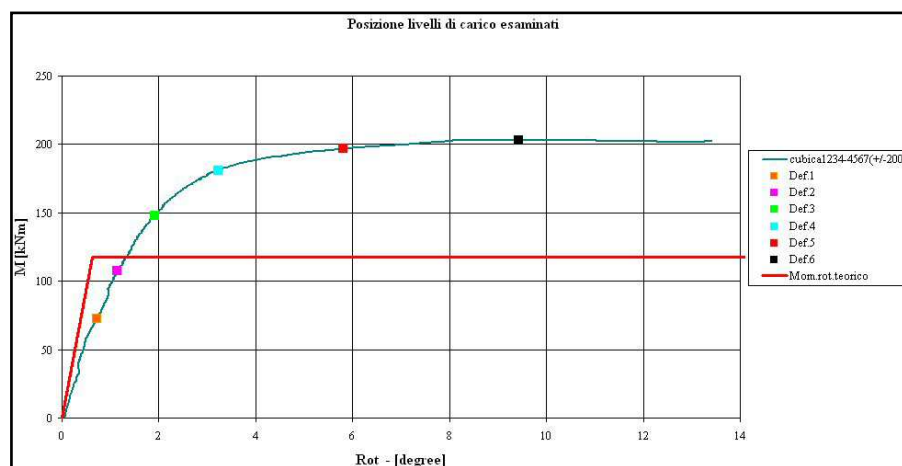
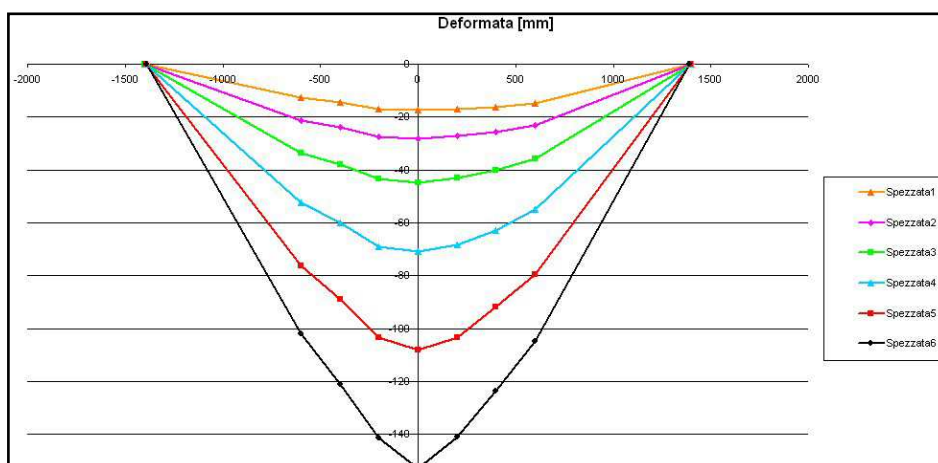
Test n°48 150x150x12 HFRH5 (S355)2H H					
Valori misurati				Parametri del test	
B [mm]	H [mm]	t [mm]	R [mm]	Distanza appoggi [mm]	Distanza carichi [mm]
150,30	149,73	12,01	20,93	2800	400
<b>Modalità di crisi</b> : completamente plastica					



Deformata del profilo al termine del test



Dettaglio della cerniera plastica al termine del test



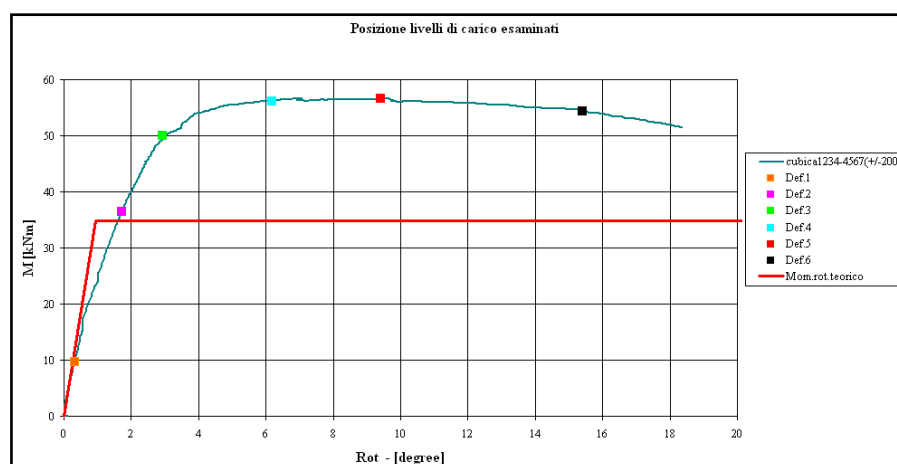
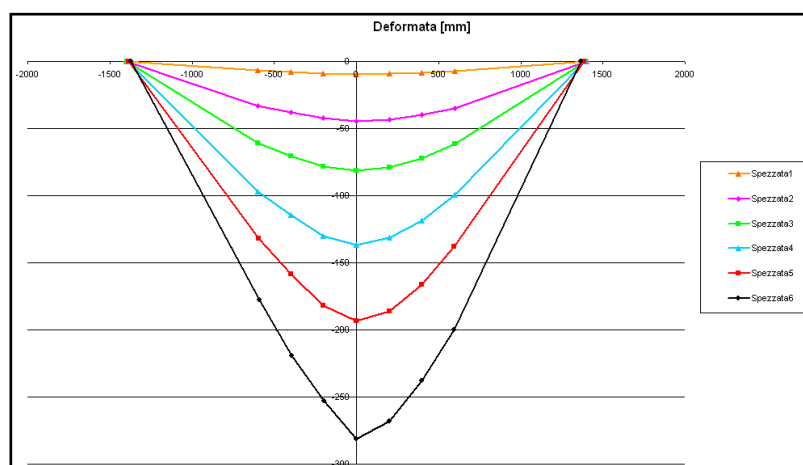
Test n°49 150x150x12 HFRH5 (\$355)2H) I					
Valori misurati				Parametri del test	
B [mm]	H [mm]	t [mm]	R [mm]	Distanza appoggi [mm]	Distanza carichi [mm]
150,58	149,90	11,98	21,63	2800	400
<b>Modalità di crisi</b> : completamente plastica					



Deformata del profilo al termine del test



Dettaglio della cerniera plastica al termine del test





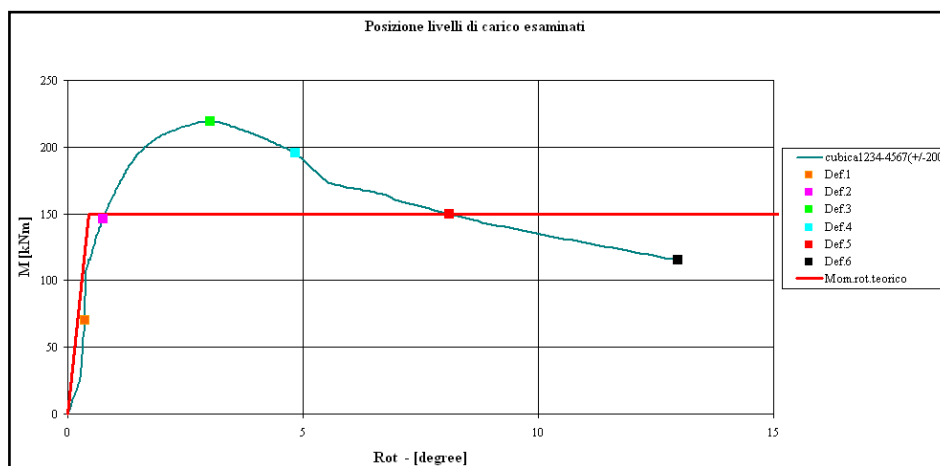
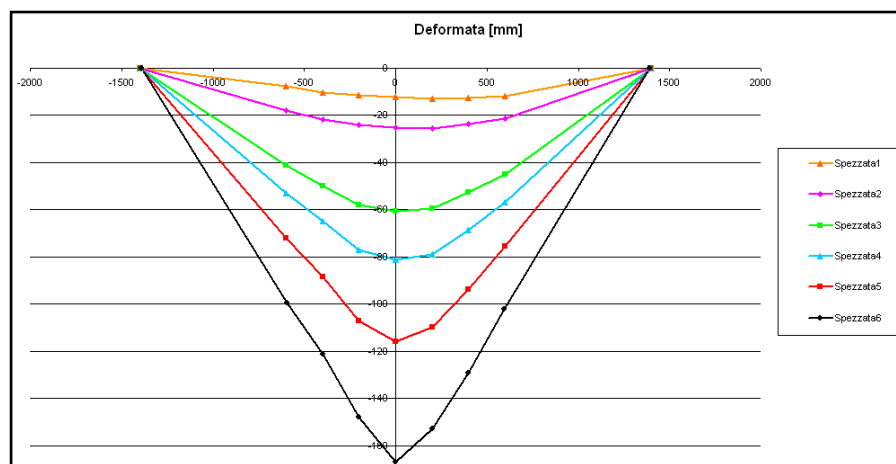
Test n°50 200x200x8 CFRH5 (\$355)2H) L					
Valori misurati				Parametri del test	
B [mm]	H [mm]	t [mm]	R [mm]	Distanza appoggi [mm]	Distanza carichi [mm]
199,90	199,42	7,80	16,94	2800	400
<b>Modalità di crisi</b> : bozza singola estesa sulla flangia compressa					



Deformata del profilo al termine del test



Dettaglio della cerniera plastica al termine del test



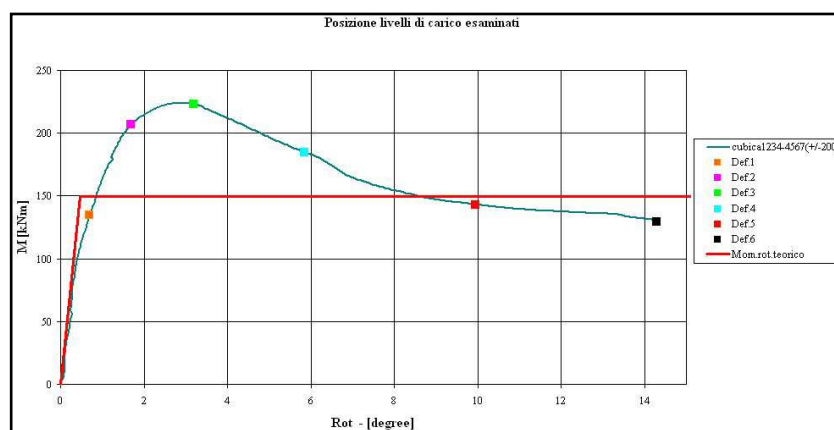
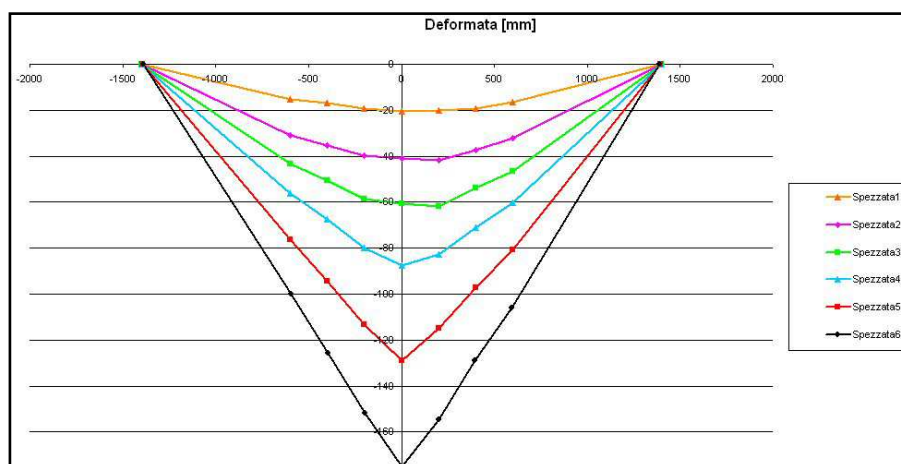
Test n°51 200x200x8 CFRH5 (S355)2H M					
Valori misurati				Parametri del test	
B [mm]	H [mm]	t [mm]	R [mm]	Distanza appoggi [mm]	Distanza carichi [mm]
200,10	199,22	8,00	16,73	2800	400
<b>Modalità di crisi</b> : bozza singola estesa sulla flangia compressa					



Deformata del profilo al termine del test



Dettaglio della cerniera plastica al termine del test



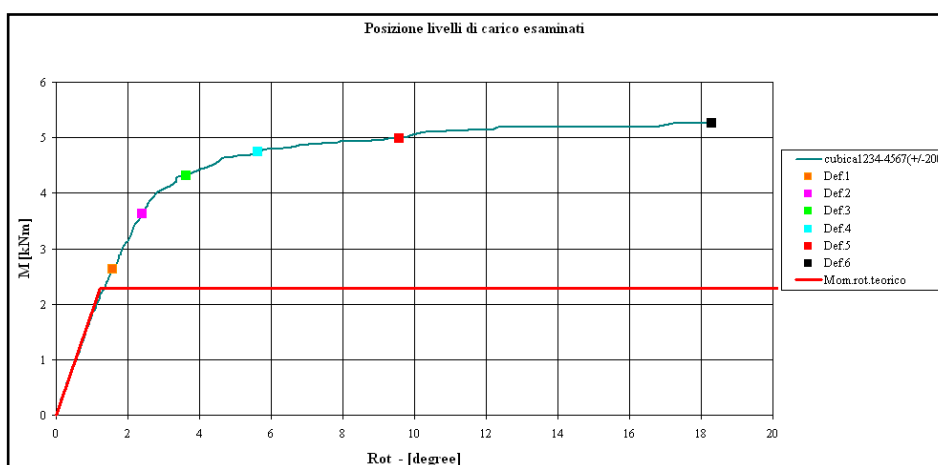
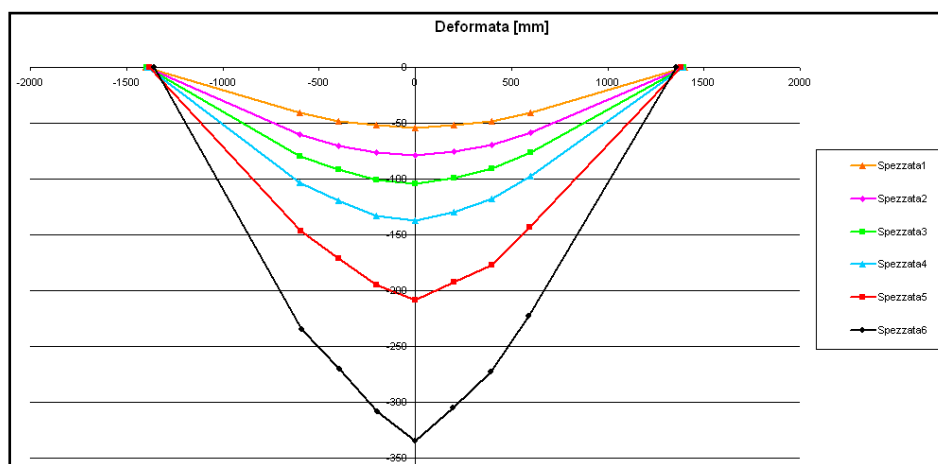
Test n°52 50x50x3 HFRH5 (\$235)RH) N					
Valori misurati				Parametri del test	
B [mm]	H [mm]	t [mm]	R [mm]	Distanza appoggi [mm]	Distanza carichi [mm]
49,20	49,56	3,14	4,29	2800	400
<b>Modalità di crisi</b> : completamente plastica					



Deformata del profilo al termine del test



Dettaglio della cerniera plastica al termine del test



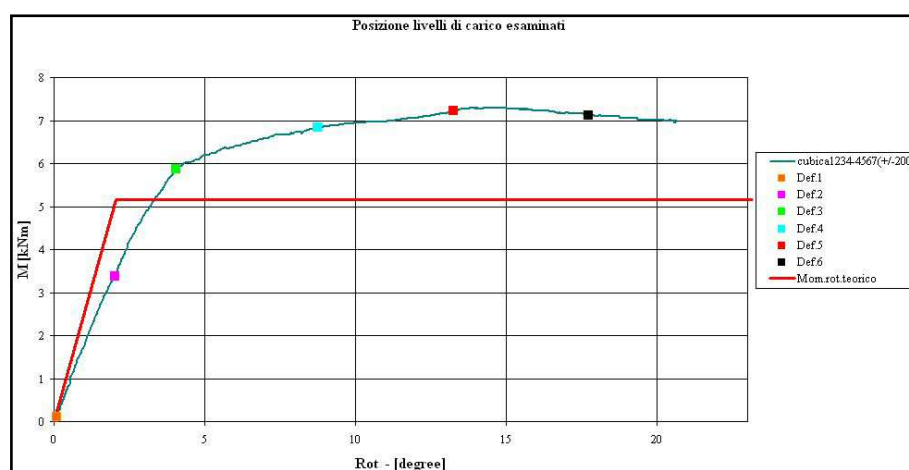
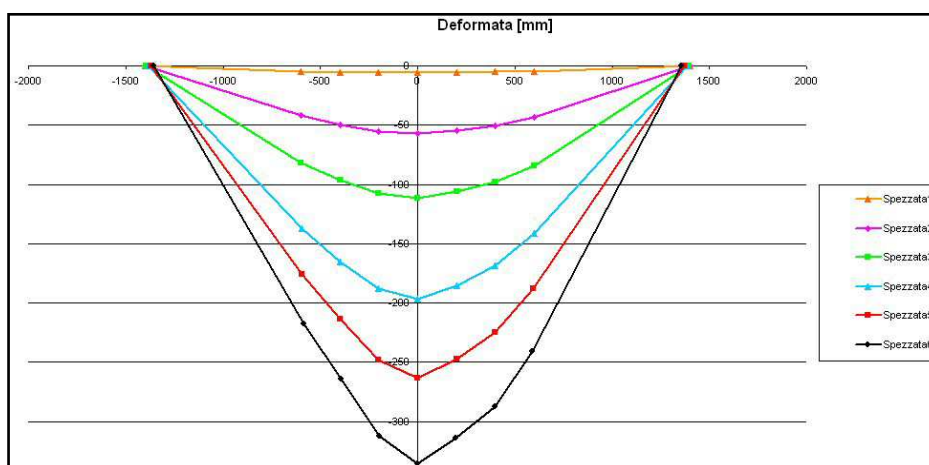
Test n°53 50x50x6 CFRH5 (S355)2H) O					
Valori misurati				Parametri del test	
B [mm]	H [mm]	t [mm]	R [mm]	Distanza appoggi [mm]	Distanza carichi [mm]
49,82	49,98	5,00	8,81	2800	400
<b>Modalità di crisi</b> : completamente plastica					



Deformata del profilo al termine del test



Dettaglio della cerniera plastica al termine del test





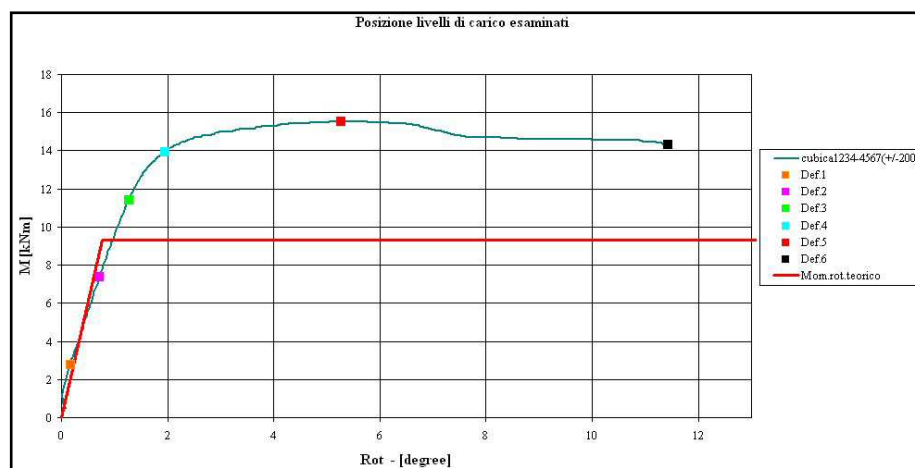
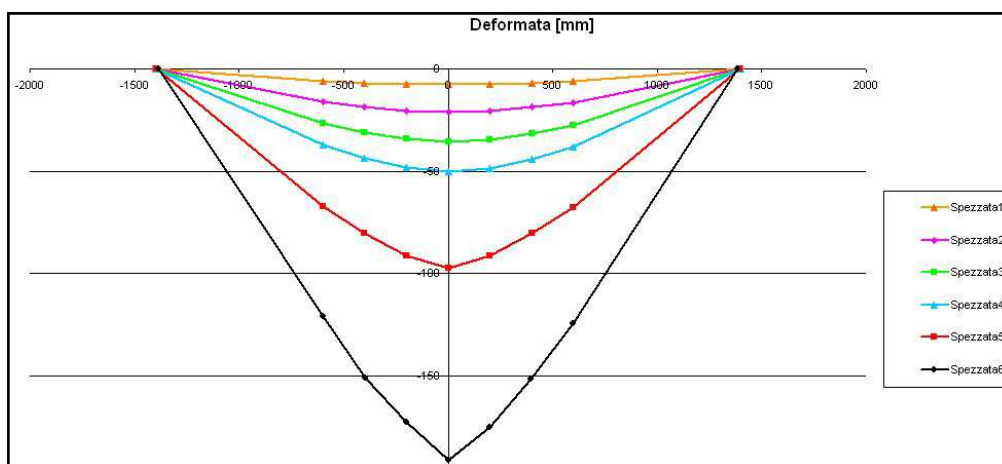
Test n°54 80x80x5 HFRH5 (\$235)RH) M					
Valori misurati				Parametri del test	
B [mm]	H [mm]	t [mm]	R [mm]	Distanza appoggi [mm]	Distanza carichi [mm]
80,20	80,42	4,70	8,12	2800	400
<b>Modalità di crisi</b> : bozza singola estesa sulla flangia compressa					



Deformata del profilo al termine del test



Dettaglio della cerniera plastica al termine del test



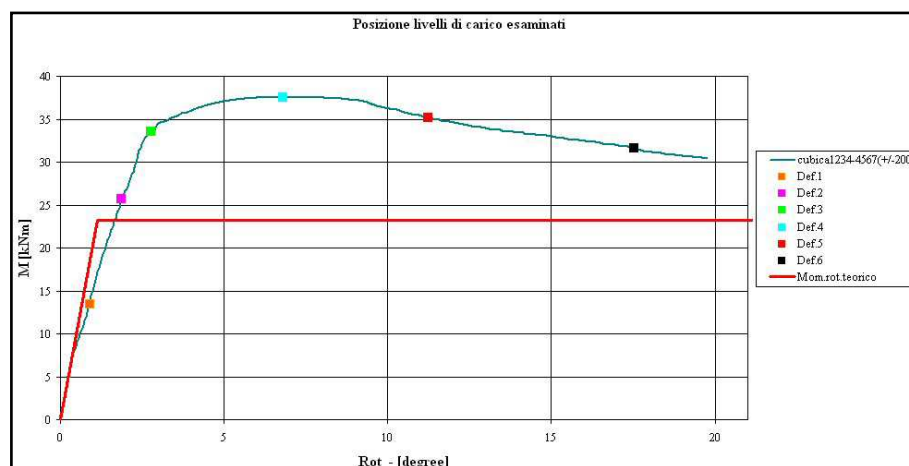
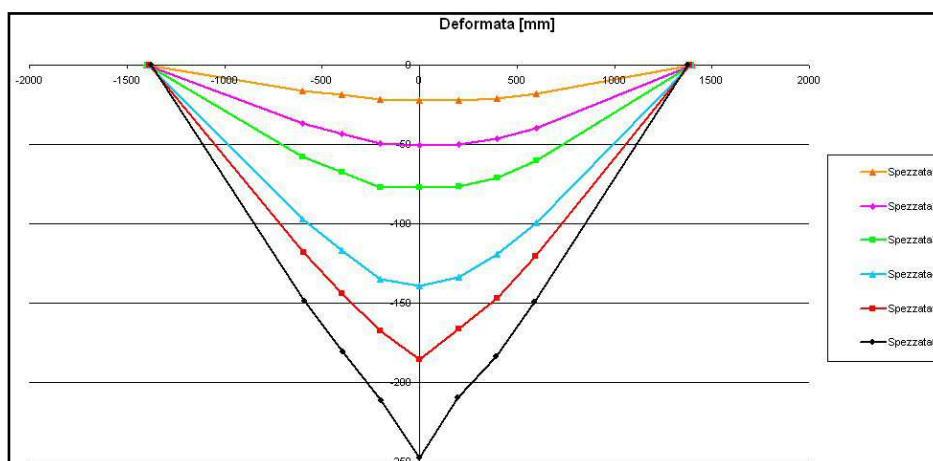
Test n°55 120x80x6 HFRH\$ (\$355)OH) Q					
Valori misurati				Parametri del test	
B [mm]	H [mm]	t [mm]	R [mm]	Distanza appoggi [mm]	Distanza carichi [mm]
119,70	79,22	5,54	8,23	2800	400
<b>Modalità di crisi</b> : bozza singola estesa sulla flangia compressa					



Deformata del profilo al termine del test



Dettaglio della cerniera plastica al termine del test



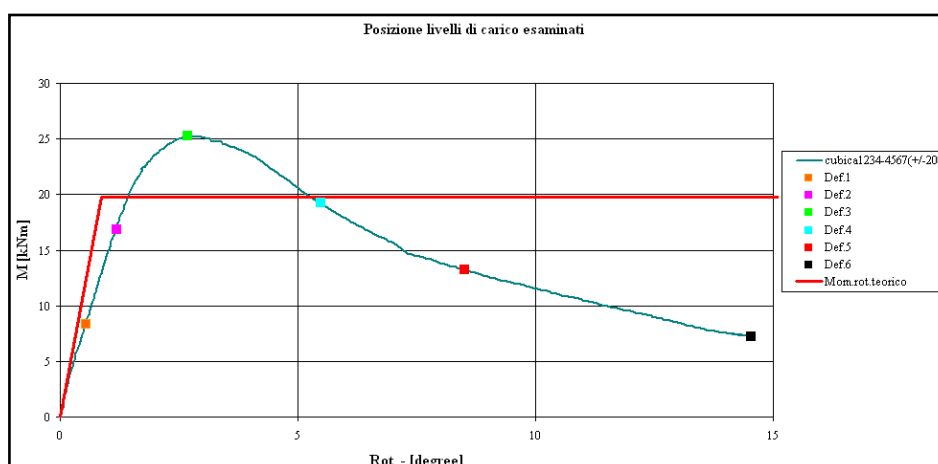
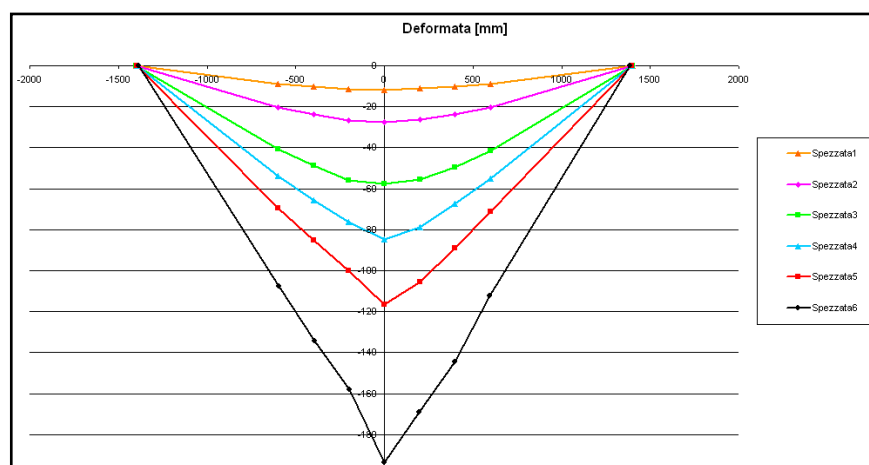
Test n°56 150x100x3 CFRH5 (S355)2H S					
Valori misurati				Parametri del test	
B [mm]	H [mm]	t [mm]	R [mm]	Distanza appoggi [mm]	Distanza carichi [mm]
150,44	100,40	3,14	5,94	2800	400
<b>Modalità di crisi</b> : bozza singola estesa sulla flangia compressa					



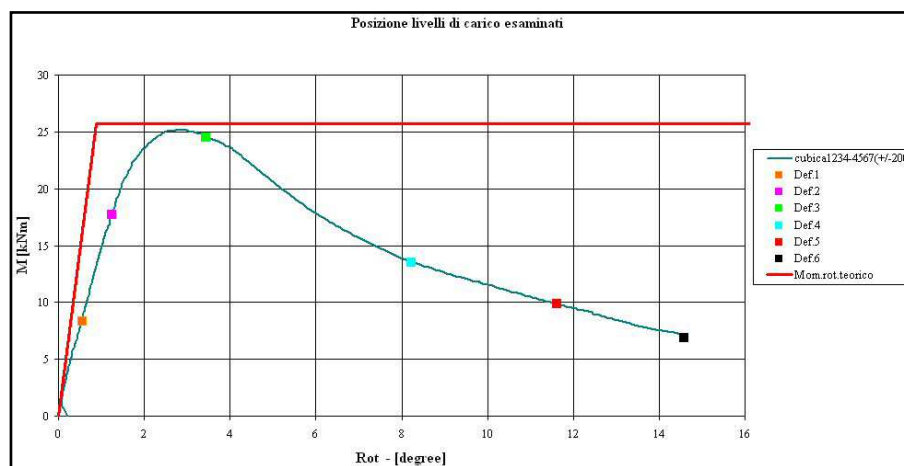
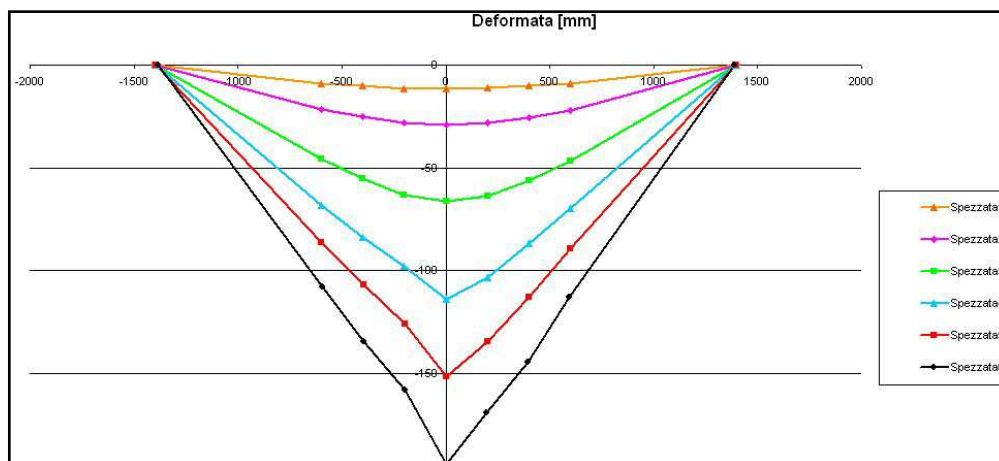
Deformata del profilo al termine del test



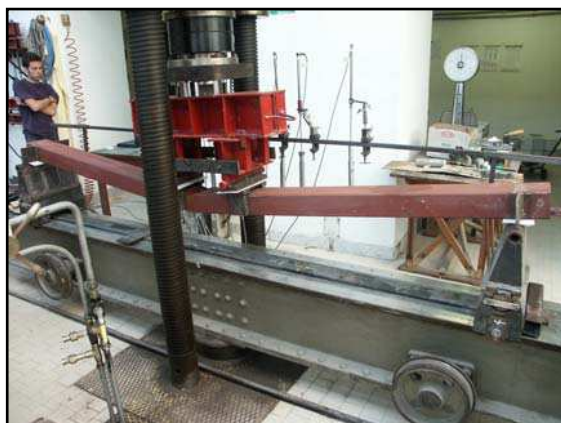
Dettaglio della cerniera plastica al termine del test



Test n°57 150x100x4 CFRH5 (S355)2H T					
Valori misurati				Parametri del test	
B [mm]	H [mm]	t [mm]	R [mm]	Distanza appoggi [mm]	Distanza carichi [mm]
150,04	99,97	4,40	6,96	2800	400
<b>Modalità di crisi</b> : bozza singola estesa sulla flangia compressa					



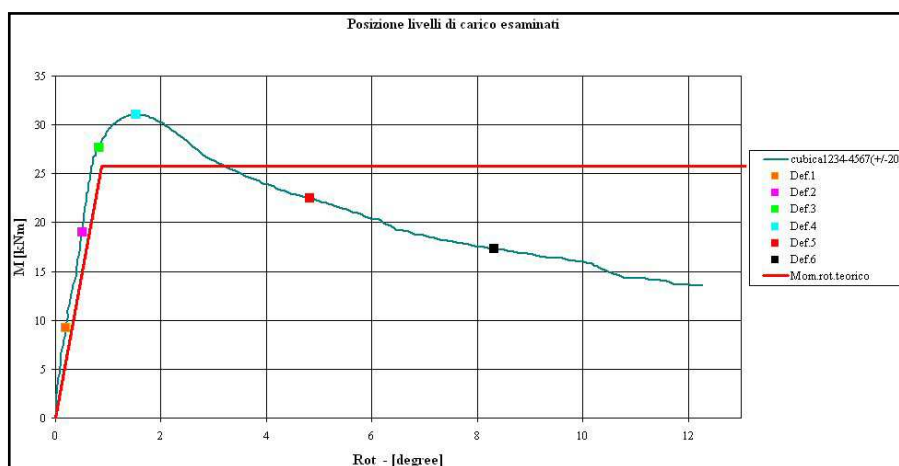
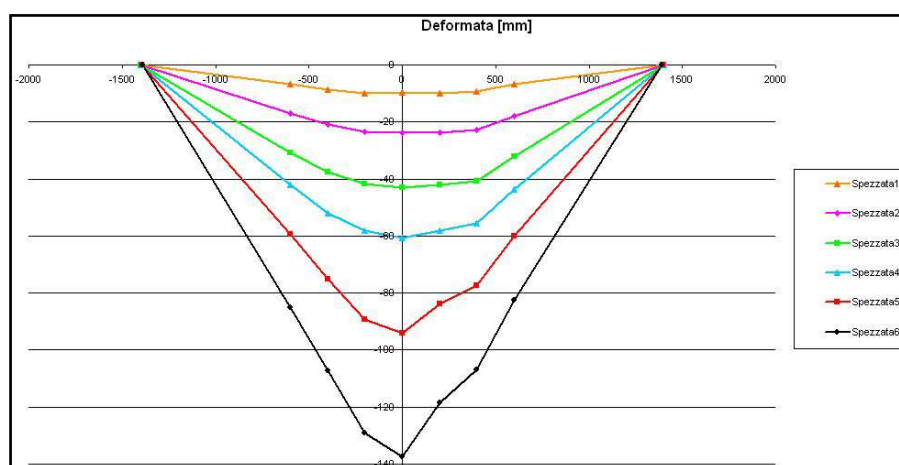
Test n°58 150x100x4 CFRH5 (\$355)2H) U					
Valori misurati				Parametri del test	
B [mm]	H [mm]	t [mm]	R [mm]	Distanza appoggi [mm]	Distanza carichi [mm]
150,05	100,03	4,00	9,53	2800	400
<b>Modalità di crisi</b> : bozza singola estesa sulla flangia compressa					



Deformata del profilo al termine del test



Dettaglio della cerniera plastica al termine del test





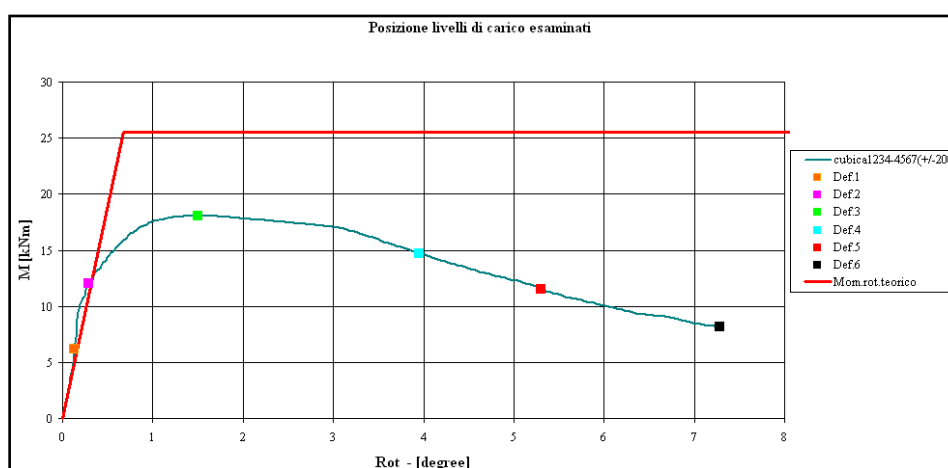
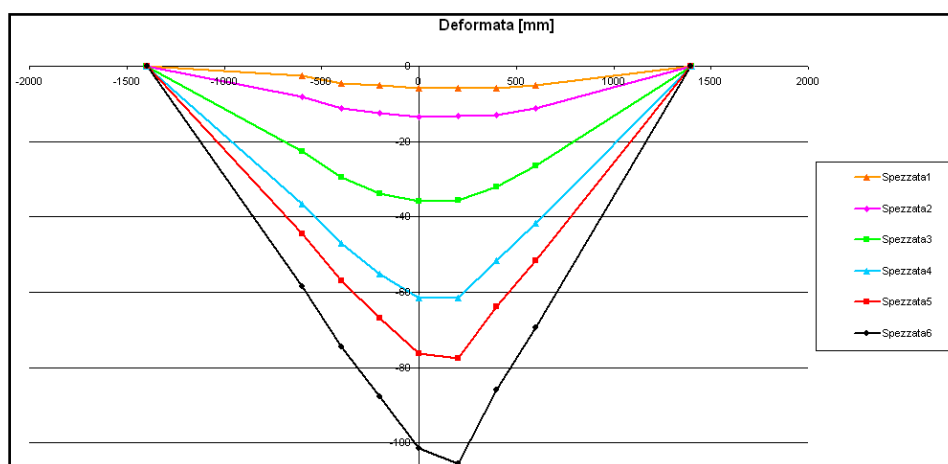
Test n°59 200x100x4 HFRH5 (\$275)R AB					
Valori misurati				Parametri del test	
B [mm]	H [mm]	t [mm]	R [mm]	Distanza appoggi [mm]	Distanza carichi [mm]
199,96	99,58	3,84	7,89	2800	400
<b>Modalità di crisi</b> : bozza singola estesa sulla flangia compressa					



Deformata del profilo al termine del test



Dettaglio della cerniera plastica al termine del test



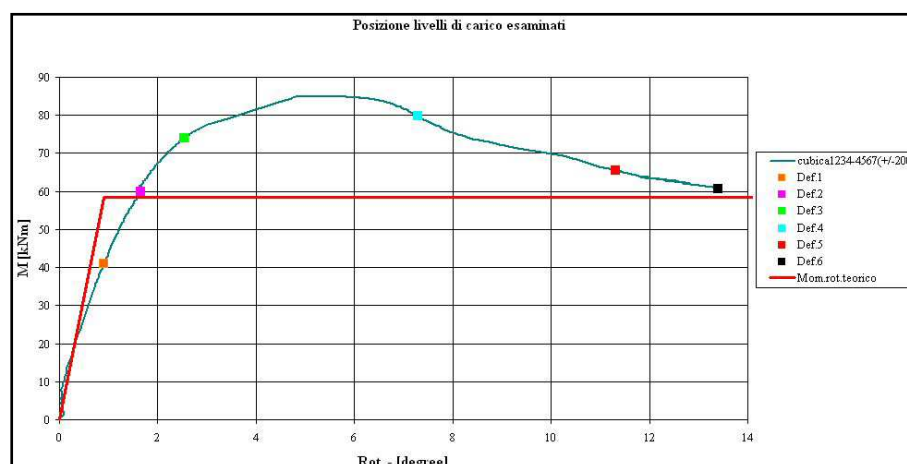
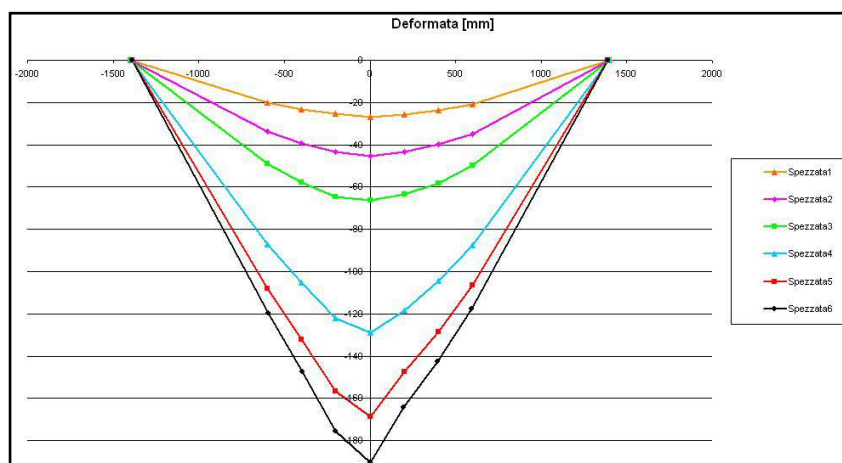
Test n°60 200x100x8 HFRH5 (\$355)OR AC					
Valori misurati				Parametri del test	
B [mm]	H [mm]	t [mm]	R [mm]	Distanza appoggi [mm]	Distanza carichi [mm]
199,60	99,70	7,74	9,74	2800	400
<b>Modalità di crisi</b> : bozza singola estesa sulla flangia compressa					



Deformata del profilo al termine del test



Dettaglio della cerniera plastica al termine del test



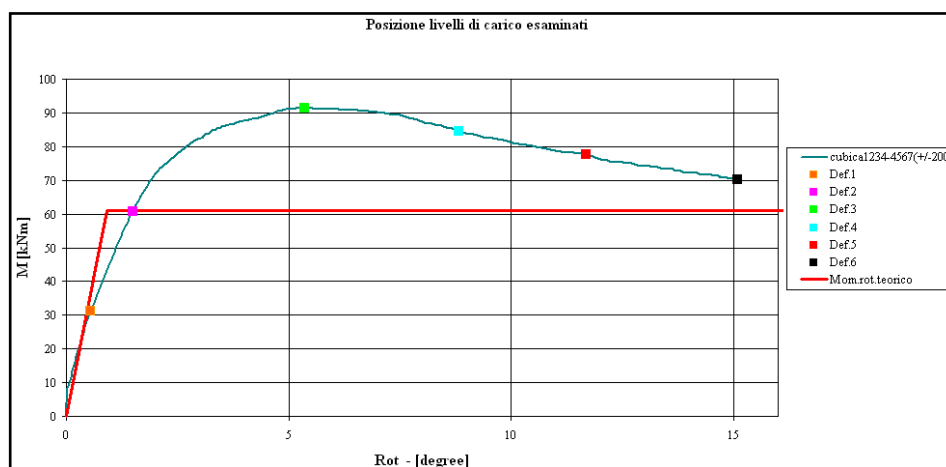
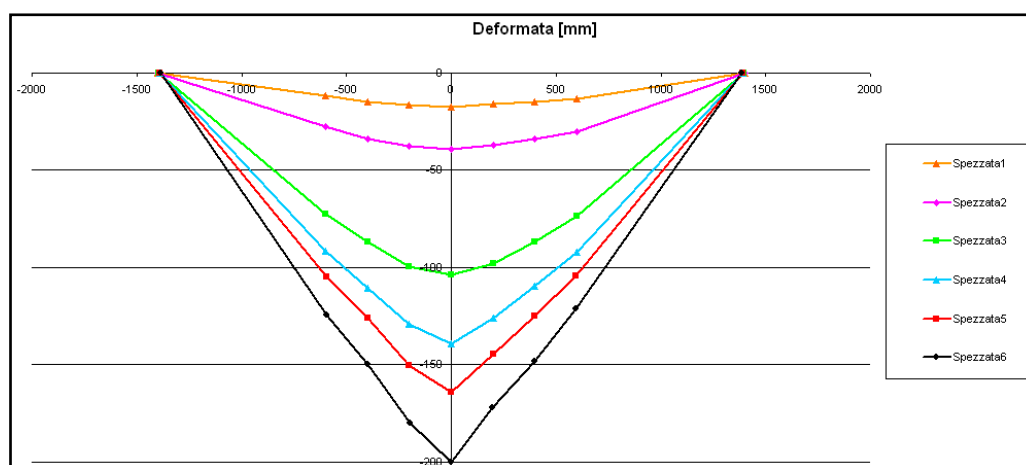
Test n°61 200x100x8 HFRH\$ (\$355)OR) AD					
Valori misurati				Parametri del test	
B [mm]	H [mm]	t [mm]	R [mm]	Distanza appoggi [mm]	Distanza carichi [mm]
199,64	100,18	7,92	11,39	2800	400
<b>Modalità di crisi</b> : bozza singola estesa sulla flangia compressa					



Deformata del profilo al termine del test



Dettaglio della cerniera plastica al termine del test





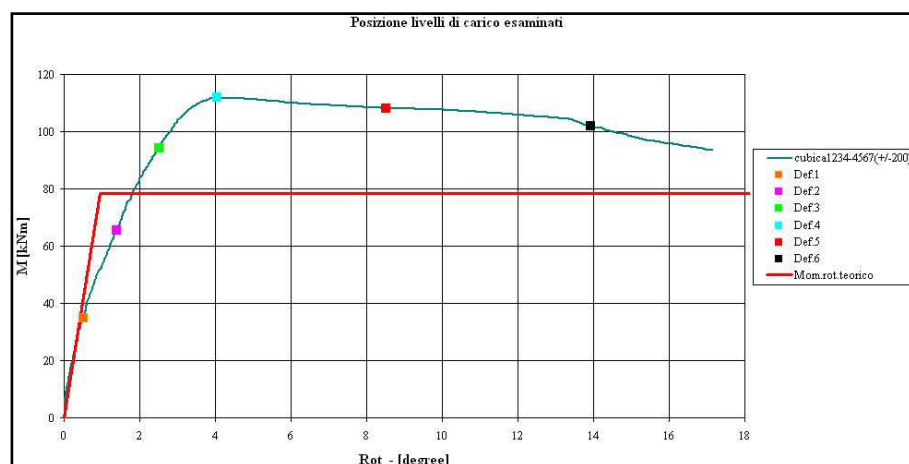
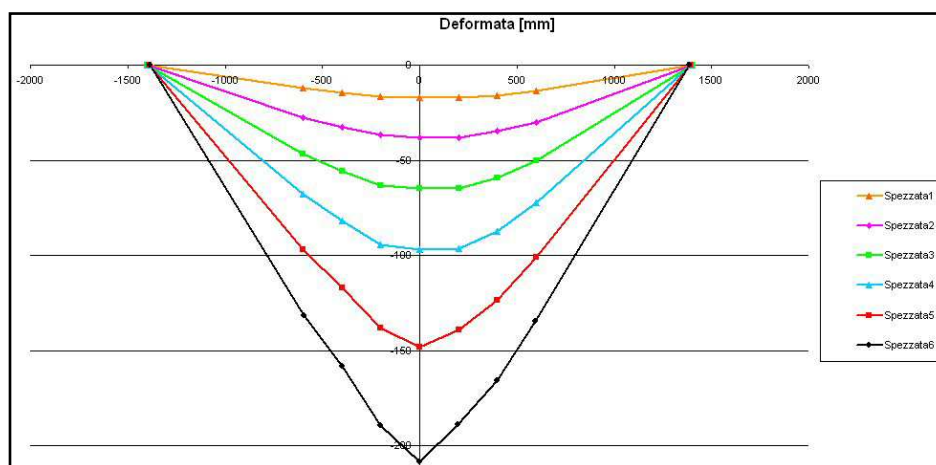
Test n°62 200x100x12,5 CFRH5 (\$355)2R) AF					
Valori misurati				Parametri del test	
B [mm]	H [mm]	t [mm]	R [mm]	Distanza appoggi [mm]	Distanza carichi [mm]
200,76	100,62	12,86	31,70	2800	400
<b>Modalità di crisi</b> : bozza singola estesa sulla flangia compressa					



Deformata del profilo al termine del test



Dettaglio della cerniera plastica al termine del test



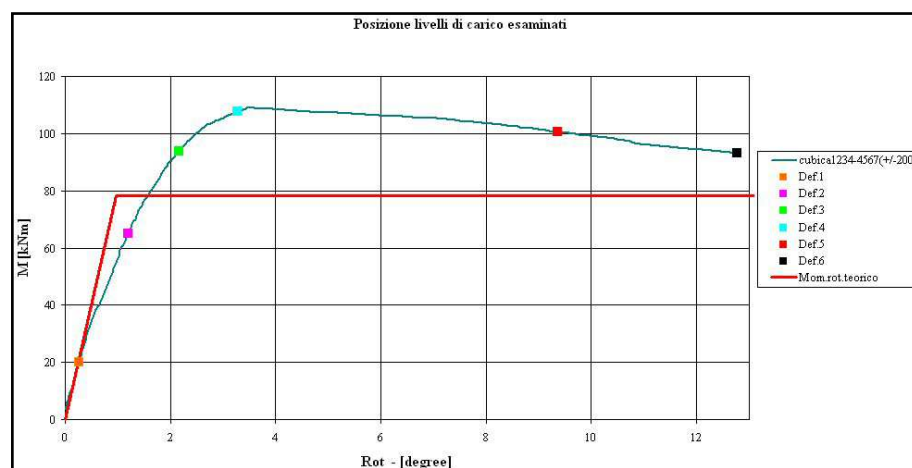
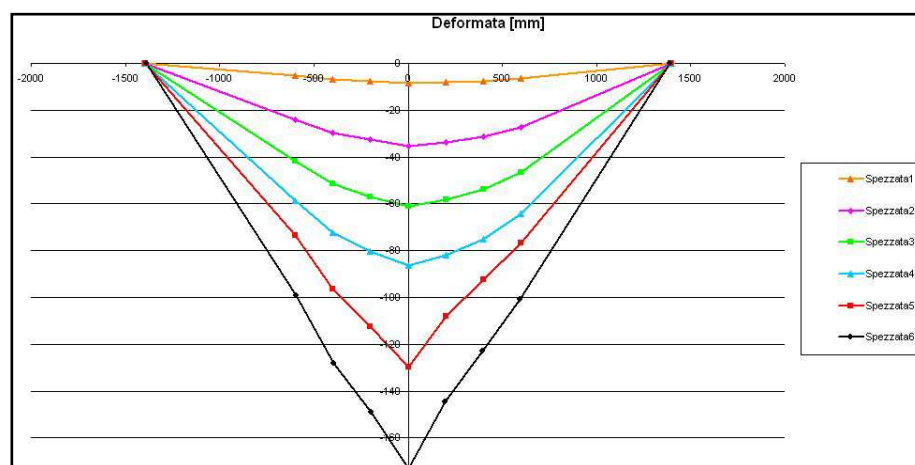
Test n°63 200x100x12,5 CFRH5 (\$355)2R) AG					
Valori misurati				Parametri del test	
B [mm]	H [mm]	t [mm]	R [mm]	Distanza appoggi [mm]	Distanza carichi [mm]
200,54	100,44	12,76	31,11	2800	400
<b>Modalità di crisi</b> : bozza singola estesa sulla flangia compressa					



Deformata del profilo al termine del test



Dettaglio della cerniera plastica al termine del test



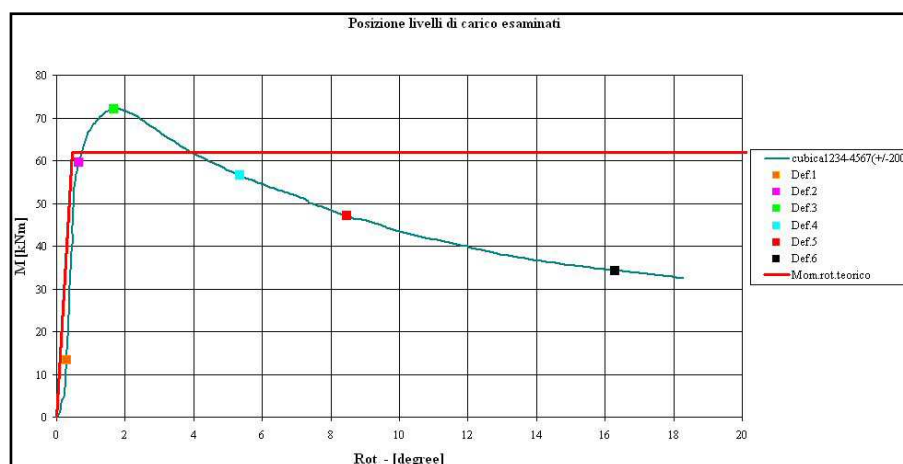
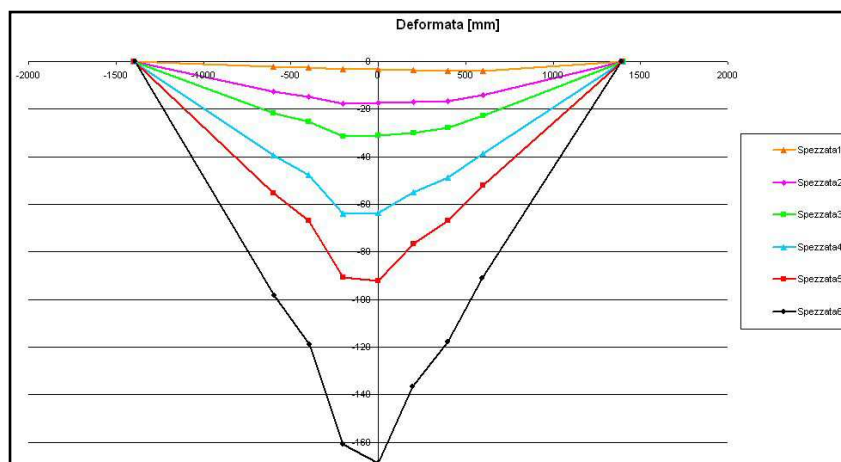
Test n°64 250x150x5 CFRH5 (\$275)0R AH					
Valori misurati				Parametri del test	
B [mm]	H [mm]	t [mm]	R [mm]	Distanza appoggi [mm]	Distanza carichi [mm]
252,00	149,84	5,10	9,70	2800	400
<b>Modalità di crisi</b> : bozza singola estesa sulla flangia compressa					



Deformata del profilo al termine del test



Dettaglio della cerniera plastica al termine del test



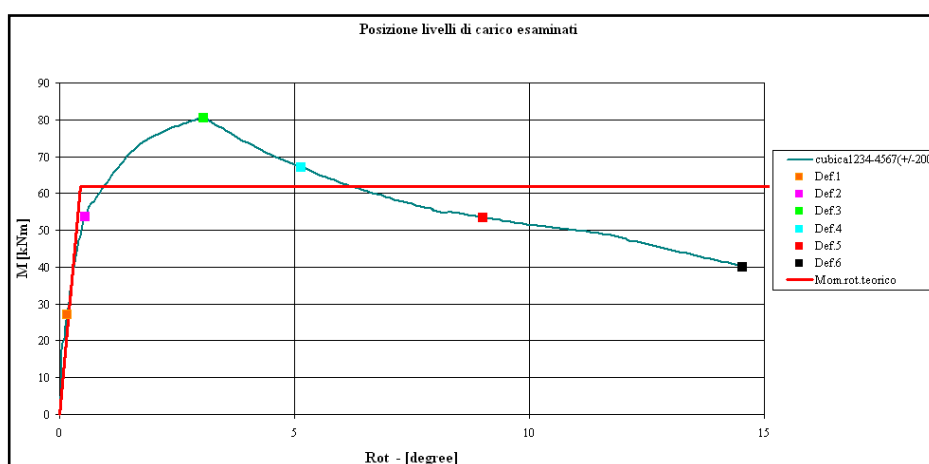
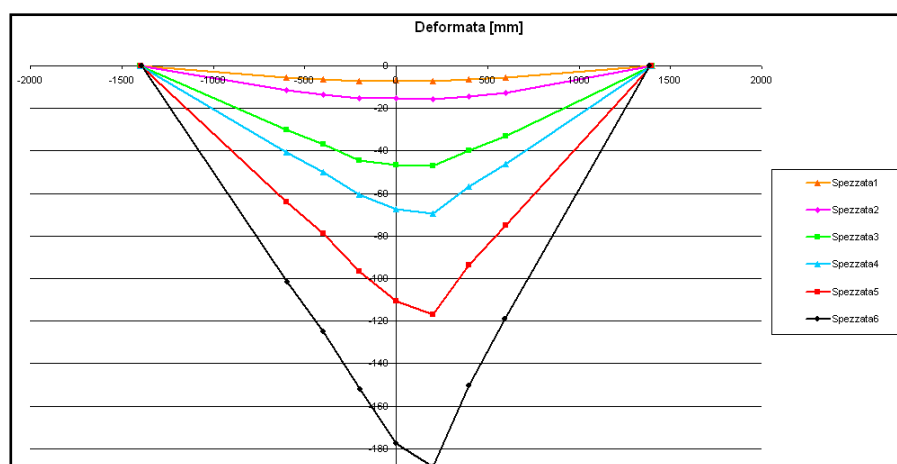
Test n°65 250x150x5 CFRH5 (\$275)OR AI					
Valori misurati				Parametri del test	
B [mm]	H [mm]	t [mm]	R [mm]	Distanza appoggi [mm]	Distanza carichi [mm]
251,85	149,83	5,34	11,43	2800	400
<b>Modalità di crisi</b> : bozza singola estesa sulla flangia compressa					



Deformata del profilo al termine del test



Dettaglio della cerniera plastica al termine del test





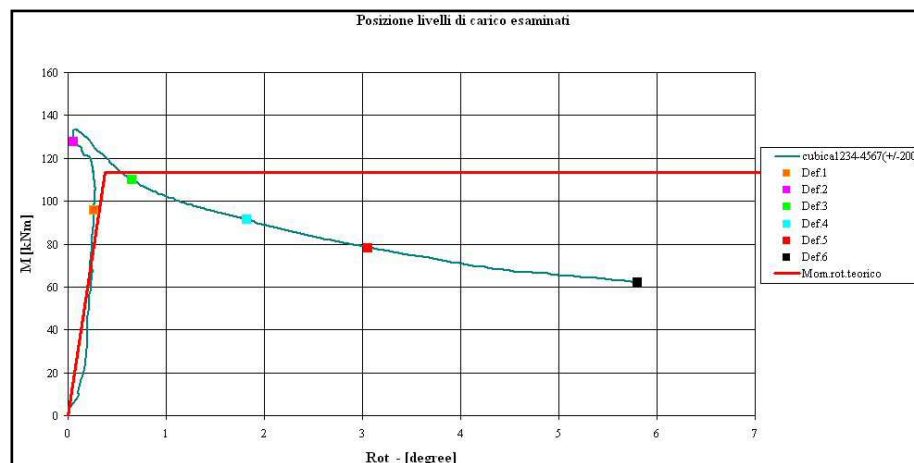
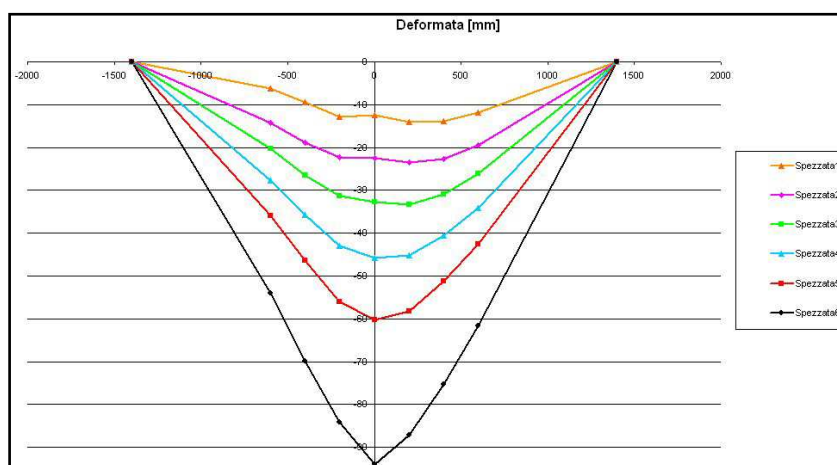
Test n°66 250x150x5 CFRH5 (\$355)2R) AL					
Valori misurati				Parametri del test	
B [mm]	H [mm]	t [mm]	R [mm]	Distanza appoggi [mm]	Distanza carichi [mm]
151,00	250,00	4,68	9,53	2800	400
<b>Modalità di crisi</b> : bozza singola estesa sulla flangia compressa					



Deformata del profilo al termine del test



Dettaglio della cerniera plastica al termine del test



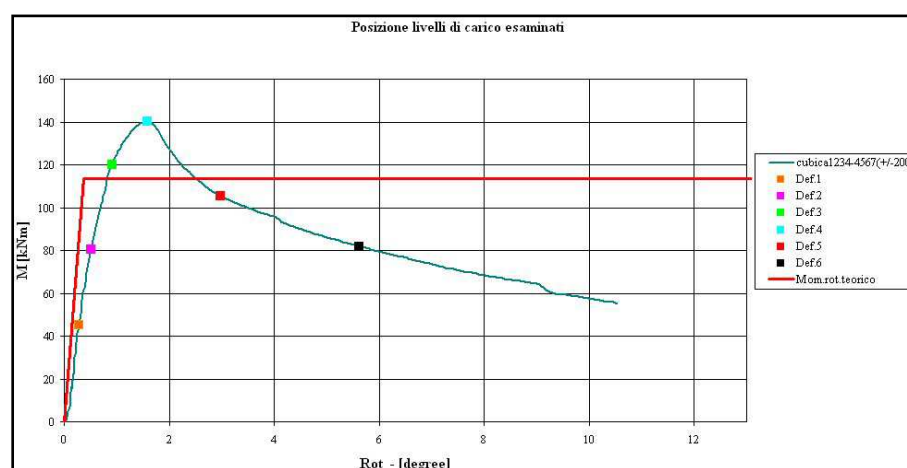
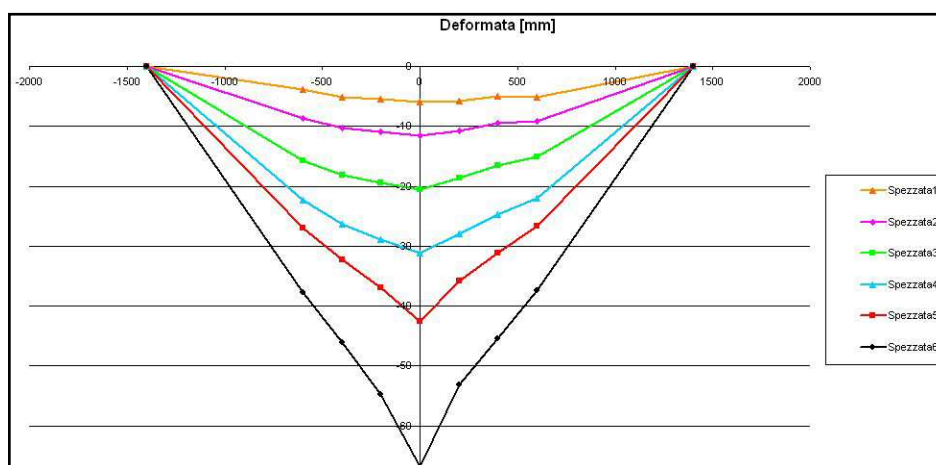
Test n°67 250x150x5 CFRH5 (\$355)2R) AM					
Valori misurati				Parametri del test	
B [mm]	H [mm]	t [mm]	R [mm]	Distanza appoggi [mm]	Distanza carichi [mm]
149,92	251,00	4,60	9,10	2800	400
<b>Modalità di crisi</b> : bozza singola estesa sulla flangia compressa					



Deformata del profilo al termine del test



Dettaglio della cerniera plastica al termine del test



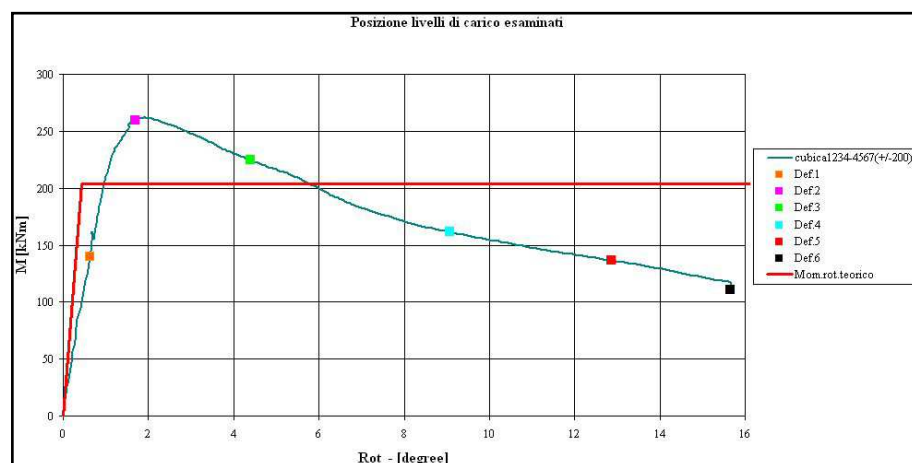
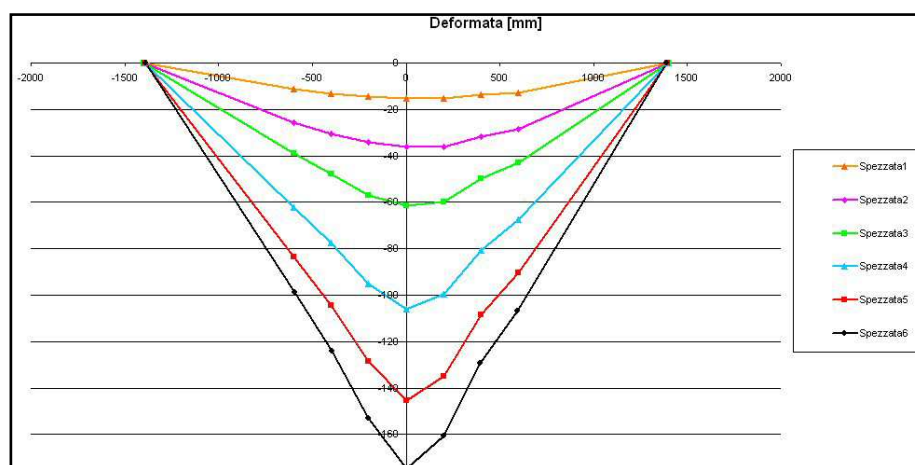
Test n°68 300x200x8 CFRH5 (S355J2R) AN					
Valori misurati				Parametri del test	
B [mm]	H [mm]	t [mm]	R [mm]	Distanza appoggi [mm]	Distanza carichi [mm]
301,12	200,50	7,86	19,32	2800	400
<b>Modalità di crisi</b> : bozza singola estesa sulla flangia compressa					



Deformata del profilo al termine del test



Dettaglio della cerniera plastica al termine del test



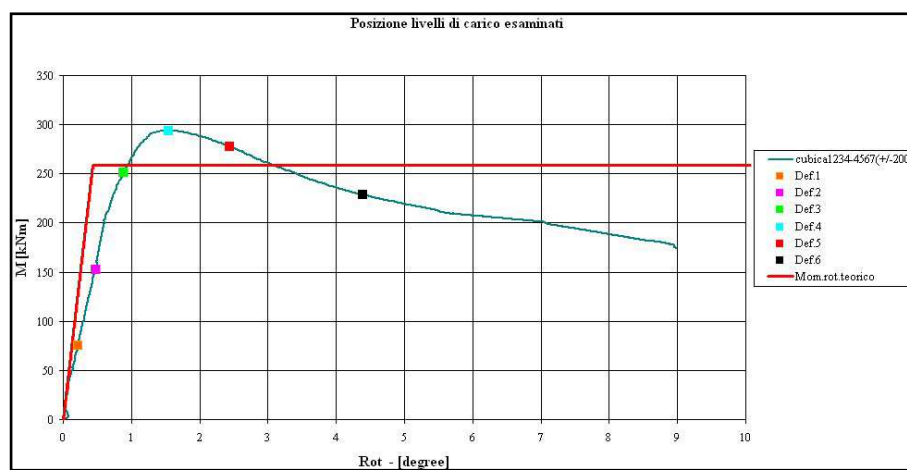
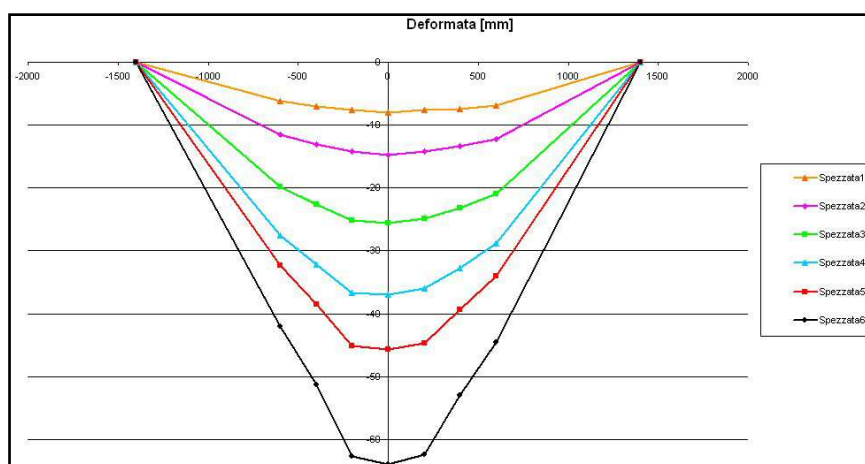
Test n°69 400x200x8 CFRH5 (\$355)2R AO					
Valori misurati				Parametri del test	
B [mm]	H [mm]	t [mm]	R [mm]	Distanza appoggi [mm]	Distanza carichi [mm]
401,00	201,00	7,82	23,00	2800	400
<b>Modalità di crisi</b> : bozza singola estesa sulla flangia compressa					



Deformata del profilo al termine del test



Dettaglio della cerniera plastica al termine del test





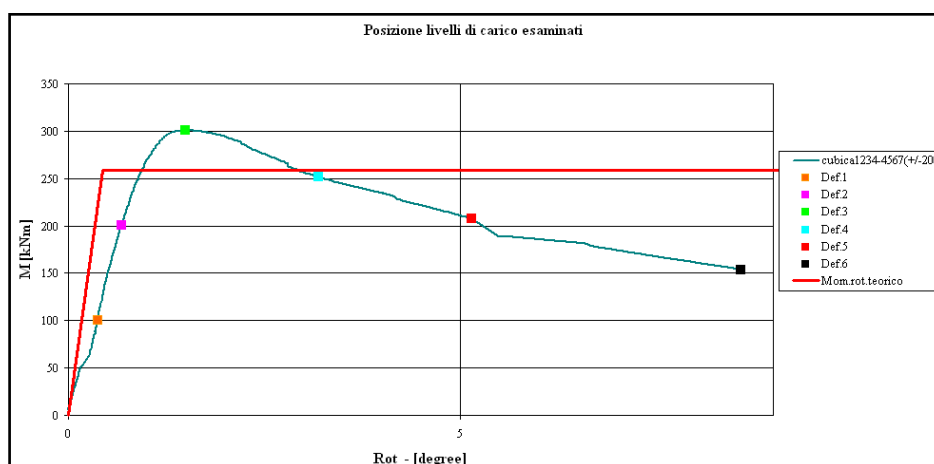
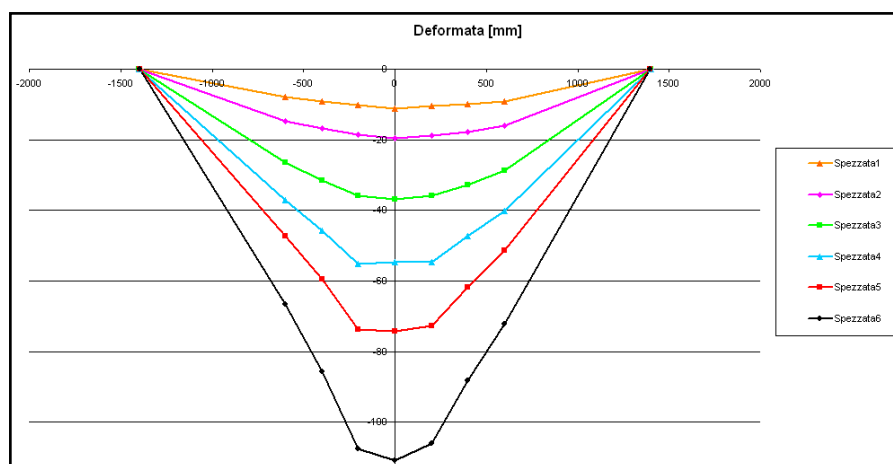
Test n°70 400x200x8 CFRH5 (\$355)2R AP					
Valori misurati				Parametri del test	
B [mm]	H [mm]	t [mm]	R [mm]	Distanza appoggi [mm]	Distanza carichi [mm]
400,00	206,00	8,20	23,50	2800	400
<b>Modalità di crisi</b> : bozza singola estesa sulla flangia compressa					



Deformata del profilo al termine del test



Dettaglio della cerniera plastica al termine del test



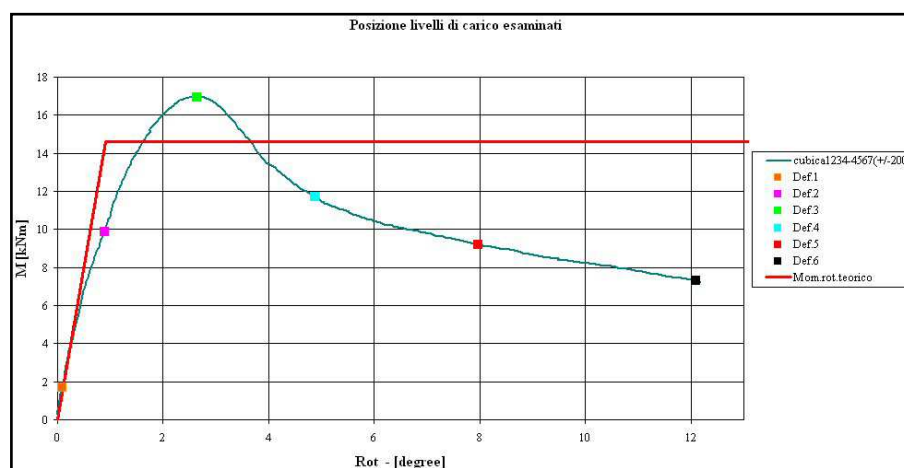
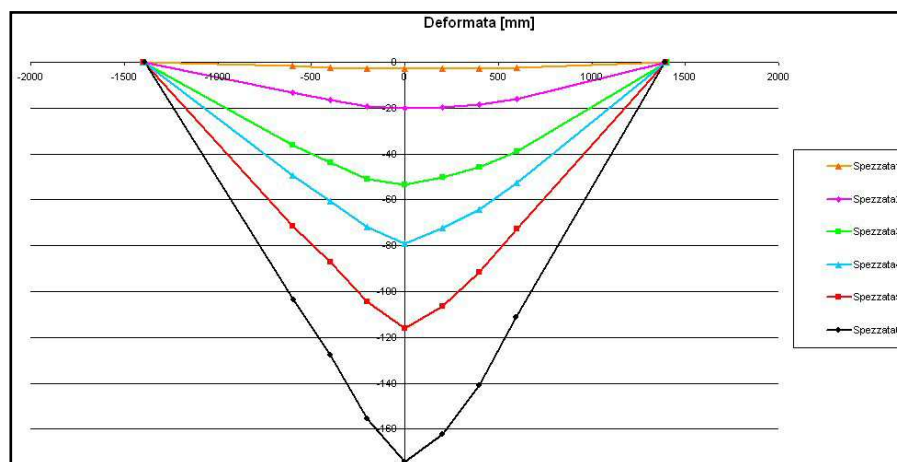
Test n°71 100x100x3 CFRHS (S355)2R AQ					
Valori misurati				Parametri del test	
B [mm]	H [mm]	t [mm]	R [mm]	Distanza appoggi [mm]	Distanza carichi [mm]
100,70	99,25	2,93	5,91	2800	400
<b>Modalità di crisi</b> : bozza singola estesa sulla flangia compressa					



Deformata del profilo al termine del test



Dettaglio della cerniera plastica al termine del test



## **5.6 Conclusioni**

I risultati mostrano come i carichi ultimi siano sensibilmente più elevati di quelli nominali, in particolare per i profili formati a freddo; questo dipende dal fatto che le proprietà del materiale durante il processo di lavorazione vengano modificate.

L'analisi delle curve momento – rotazione ha messo in evidenza che quando il profilo è compatto, ovvero con snellezza della flangia  $\lambda_f < 16$ , la duttilità sembra essere indipendente dalla snellezza dell'anima. In questi casi, le curve sperimentali, come si vede nelle schede dei test, sono caratterizzate da un plateau plastico ben definito per qualsiasi valore della snellezza dell'anima  $\lambda_w$ .

Il comportamento è invece differente per i profili snelli, ovvero quelli caratterizzati da  $\lambda_w > 24$ ; per questi al momento massimo corrisponde un picco della curva.

È da notare come il profilo del test n°57 non riesce ad attingere al proprio momento plastico, ma solamente a quello di snervamento, per cui è stato classificato, per quanto detto nel Capitolo 4 come di Classe 3.

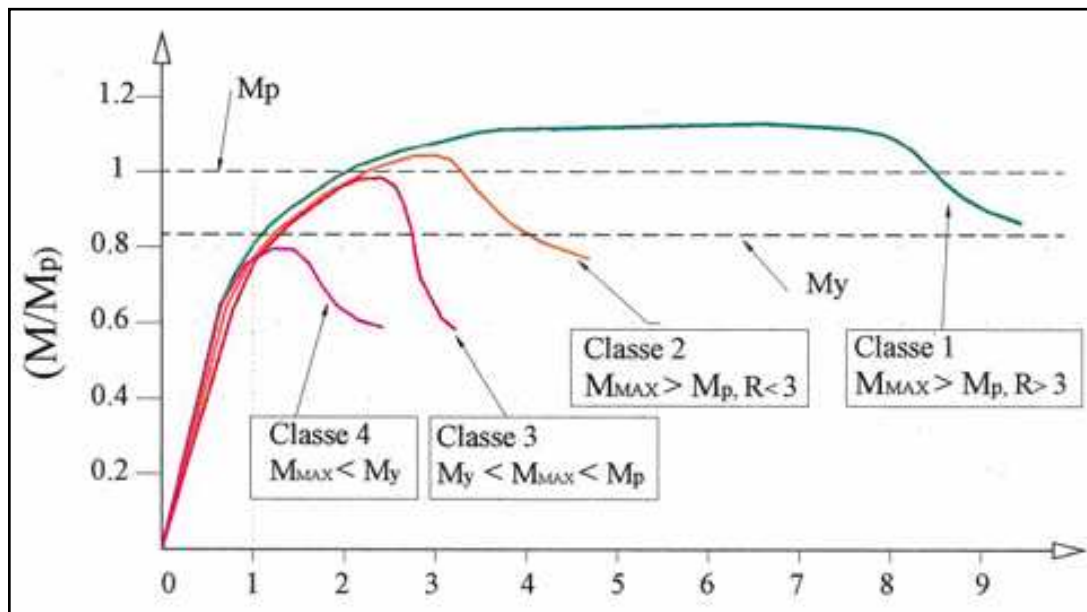
Il profilo del test n°59 invece non riesce nemmeno a raggiungere il suo momento di snervamento, è quindi da ritenersi da Classe 4.

In conclusione quindi si può affermare che tutti i profili testati nella campagna di prove svolta durante la seguente tesi possono essere utilizzati nella progettazione in campo plastico, ad eccezione dei profili relativi ai test n°57 e n°59.

## 6- CAPACITA' ROTAZIONALE

### 6.1 Generalità

Come detto in precedenza, per eseguire un'analisi in campo plastico, un profilo deve essere in grado di sviluppare il suo momento di completa plasticizzazione e deformarsi in modo tale da possedere una rotazione sufficientemente elevata. La duttilità necessaria affinché ciò avvenga è in genere connessa alla deformazione ultima del materiale che però può non essere raggiunta a causa del verificarsi di fenomeni di instabilità locale. Tali fenomeni si manifestano con una distorsione della forma della sezione ed una conseguente riduzione della capacità portante dell'elemento strutturale. A tal proposito le principali normative attualmente in vigore, prendendo in considerazione l'effetto che l'instabilità locale ha sul comportamento flessionale della trave, prevedono una classificazione delle sezioni trasversali, vedi Capitolo 4, in funzione del loro momento ultimo e della capacità rotazionale, fig.6.1.

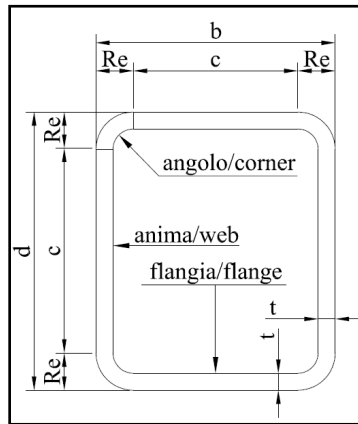


**Fig. 6.1** Classificazione delle sezioni

Il fattore principale che influenza i fenomeni di instabilità locale è il rapporto tra le dimensioni geometriche ( $b/t$ ,  $d/t$  o  $c/t$  secondo l'Eurocodice 3) degli elementi piani compressi componenti il profilo.

Escludendo i profili più compatti, ovvero quelli di Classe 1, il cui collasso è determinato dalla crisi del materiale base, la crisi di un profilo tubolare rettangolare CFRHS è governato

dall'instabilità locale della flangia compressa che dipende dalla snellezza  $b/t$  e dal grado di vincolo offerto dalle anime, funzione di  $d/t$ , fig. 6.2.



**Fig. 6.2** Sezione trasversale profilo RHS

In base a quanto detto le raccomandazioni dei codici, al fine di classificare i profili, definiscono dei limiti per tali grandezze; in genere tutte le normative applicano gli stessi limiti di snellezza sia ai profili RHS sia alle sezioni a I.

In alcune indagini condotte da Zhao e Hancock (1991, 1992), gli autori hanno riscontrato nei profili RHS con un rapporto  $d/b = 2$  e snellezza di anima e flangia inferiori a quelle proposte dai codici per l'analisi in campo plastico, fenomeni di instabilità in avvenuti per piccoli valori della rotazione.

I primi profili utilizzati in campo strutturale erano a sezione quadrata (SHS), o al più rettangolare, ma con rapporti  $d/b$  modesti, questo comportava quindi uno scarso interesse verso lo studio del comportamento meccanico dell'elemento in funzione della snellezza dell'anima. Negli ultimi tempi invece la produzione si è orientata verso profili RHS con rapporti  $d/b$  più elevati, di conseguenza si è quindi avuto uno spostamento di attenzione verso uno studio più approfondito dei profili RHS con alto rapporto geometrico  $d/b$ .

Differenti ricerche hanno confermato che, nel campo dei profili con valori elevati di  $d/b$  ( $=2$ ) alcuni RHS, pur rispettando gli attuali limiti di snellezza definiti dai codici EC3, AS 4100 e AISC – LRFD, non hanno manifestato la capacità di rotazione necessaria per un'analisi in campo plastico.

Le stesse ricerche hanno invece evidenziato che nel campo dei profili con valori  $d/b < 1$  ( $= 1/2$ ) la classificazione dei profili cavi secondo l'Eurocodice 3 sembra essere eccessivamente cautelativa.

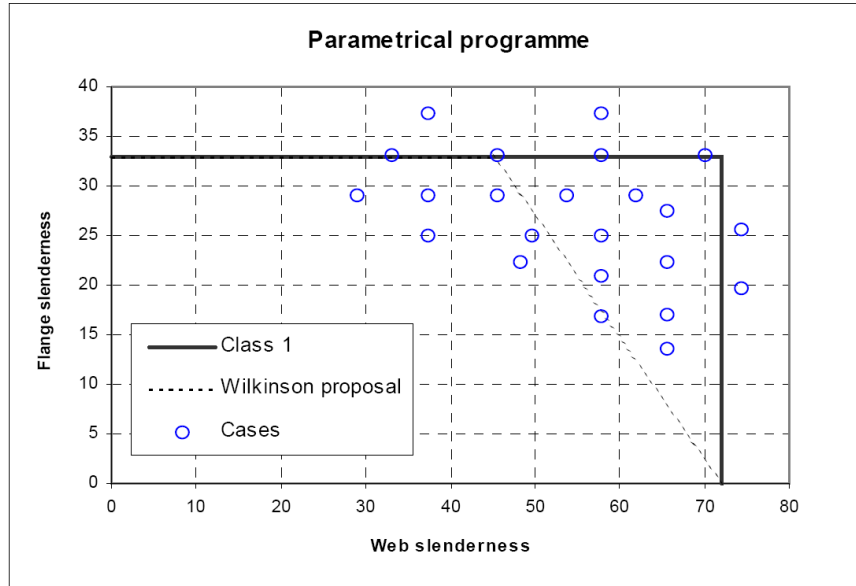
Questa discordanza è conseguenza del fatto che i limiti utilizzati per i profili RHS sono solo un'estensione dei risultati di prove e studi eseguite sui profili a I oppure su elementi piastra, questo perché manca un adeguato livello di conoscenze specifiche su questi elementi.

Le differenze tra le due sezioni risultano in realtà sostanziali; per quanto riguarda l'anima, mentre per gli RHS il vincolo è costituito dalla parte terminale della flangia, per la trave a doppio T è la parte centrale a creare il supporto; il piatto d'anima delle travi ad I, avendo i bordi simmetricamente irrigiditi, risulta quindi più efficacemente vincolato rispetto a quello degli RHS.

Per quanto riguarda la flangia, quella degli RHS risulta avere i bordi ugualmente irrigiditi, quella dei profili ad I risulta invece avere i bordi liberi; in questo caso è quindi la piattabanda di questi ultimi a risultare più penalizzata. Inoltre, per gli RHS l'area delle due anime rappresenta una quota parte dal 50% (per SHS con  $d/b = 1$ ) al 75% (per RHS con  $d/b = 3$ ) dell'area totale della sezione, mentre per una sezione ad I l'anima è tipicamente il 35-45% del totale. Si evince quindi che l'influenza dell'anima è maggiore nel caso RHS o SHS piuttosto che per un profilo a doppio T.

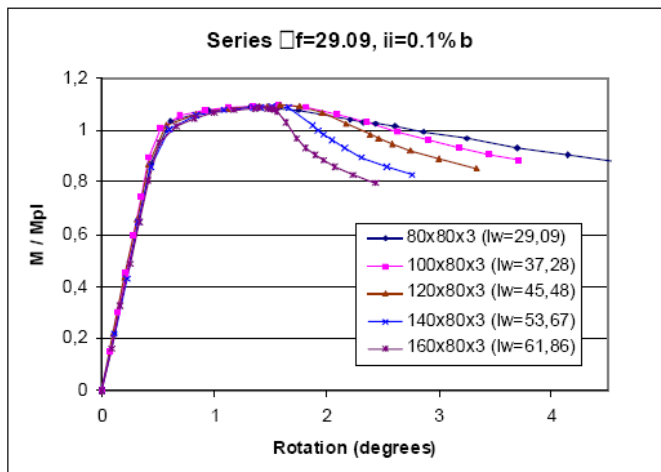
L'attuale filosofia di questi codici è di assegnare limiti di snellezza dell'anima e della flangia indipendenti tra loro; curve con uguale capacità di rotazione, tracciate in base alle prove effettuate, hanno invece evidenziato che quest'ultima è funzione dell'interazione tra flangia e anima di cui si ritiene opportuno tener conto per la definizione di suddetti limiti, ponendoli in relazione tra loro.

Per meglio comprendere questo ultimo aspetto, è utile porre l'attenzione sui risultati ottenuti da un programma parametrico eseguito per valutare l'influenza della snellezza dell'anima e della flangia sulla duttilità dei profili CFRHS. Il programma comprende l'esame di 24 profili, selezionati in un campo di snellezza corrispondente al limite tra la Classe 1 e la Classe 2, fig. 6.3.

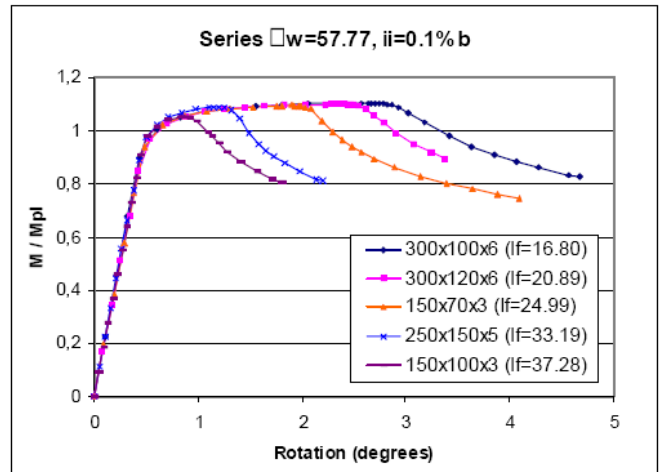


**Fig. 6.3** profili selezionati in funzione delle snellezze

Nelle figg. 6.4 e 6.5, al fine di evidenziare come sia la snellezza dell'anima che quella della flangia intervengano nella capacità rotazionale, sono rappresentate due curve momento – rotazione, ognuna relativa ad una serie di 5 profili: nella prima si è mantenuta costante la snellezza della flangia e si è fatta variare quella dell'anima, fig.6.4, nella seconda invece il parametro che varia è la snellezza dell'anima, mentre rimane costante quella della flangia, fig. 6.5.



**Fig. 6.4** Diagramma M-rot al variare di  $\lambda_w$



**Fig. 6.5** Diagramma M-rot al variare di  $\lambda_f$

Osservando il diagramma di sinistra, in cui i profili hanno la stessa snellezza della flangia, si osserva che le curve sono molto simili fino al livello del momento massimo; la pendenza della parte discendente sembra invece dipendere sensibilmente dalla snellezza dell'anima.

Le curve in fig. 6.5, relative a profili con la stessa snellezza dell'anima, mostrano invece che la snellezza della flangia determina quanto lontano giunge la curva prima di arrivare al massimo momento e che la loro pendenza nella parte discendente non sembra sensibilmente influenzata dal cambiamento della snellezza della flangia.

In considerazione dei risultati precedentemente esposti, si può quindi concludere che il momento massimo e la rotazione plastica corrispondente sembrano essere condizionati dall'instaurarsi dell'instabilità locale sulla flangia, che perciò è da considerarsi il parametro chiave che influenza le curva momento – rotazione prima del raggiungimento del carico massimo. Un'influenza limitata viene osservata quando la snellezza della flangia è situata in una zona prossima al limite di Classe 2.

La parte discendente della curva momento – rotazione invece dipende essenzialmente dalla snellezza dell'anima, con una influenza limitata della snellezza della flangia quando questa si trova vicino o sopra il limite della Classe 2.



## 6.2 Risultati della precedente fase di sperimentazione

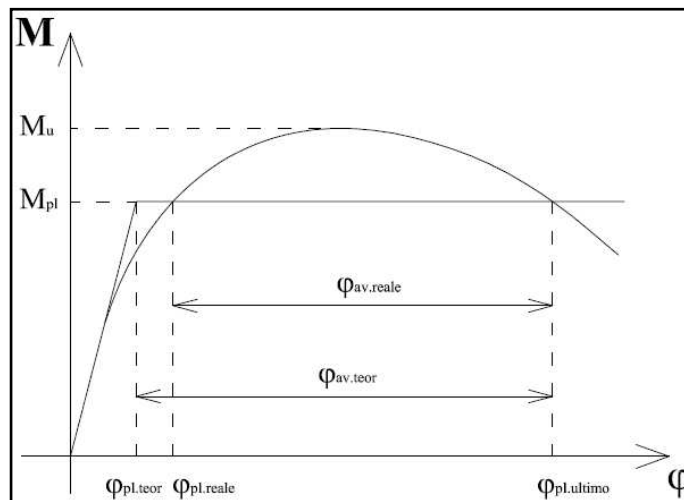
Si è ritenuto opportuno richiamare brevemente nel seguito i risultati e le conclusioni derivanti dalla prima parte della campagna sperimentale eseguita dal Dipartimento di ingegneria Strutturale dell'Università di Pisa, al fine di inquadrare in modo migliore le problematiche affrontate nell'ambito della presente tesi.

Le prove, descritte nel Capitolo 5, hanno permesso di ottenere dei diagrammi momento - rotazione ottimi dal punto di vista qualitativo e utili per determinare la capacità rotazionale "R" la quale rappresenta il parametro per stabilire la classe del profilo.

La capacità di rotazione è normalmente definita come:

$$R_{teor} = \frac{\varphi_{ultimo} - \varphi_{pl,teor}}{\varphi_{pl,teor}} \quad , \quad \varphi_{auteor} = \varphi_{pl,ultimo} - \varphi_{pl,teor} \quad ,$$

dove  $\varphi_{pl,ultimo}$  è il valore corrispondente alla rotazione al punto in cui la curva sperimentale interseca il plateau plastico della curva teorica e  $\varphi_{pl,teor}$  è il valore della rotazione corrispondente all'inizio del plateau plastico della stessa curva teorica, fig. 6.6.



**Fig. 6.6** Diagramma Momento - rotazione

In questa sperimentazione si è ritenuto più opportuno utilizzare una differente definizione di "R", per far sì che questa potesse tener conto delle reali caratteristiche del profilo (tipo di lavorazione, presenza di tensioni residue, imperfezioni etc.), capaci di modificare la forma della curva momento – rotazione.

La nostra definizione di capacità di rotazione reale risulta:

$$R_{reale} = \frac{\varphi_{ultimo} - \varphi_{pl.reale}}{\varphi_{pl.reale}} , \quad \varphi_{au.reale} = \varphi_{pl.ultimo} - \varphi_{pl.reale}$$

dove  $\varphi_{pl.ultimo}$  e  $\varphi_{pl.reale}$  sono i valori della rotazione corrispondenti ai punti dove la curva sperimentale interseca il plateau plastico della curva teorica, fig. 6.6.

I risultati più significativi della sperimentazione sono riassunti nella Tabella 6.1, dove, oltre ai valori della capacità di rotazione teorica e di quella reale, è stata riportata la classificazione sia nominale che teorica in accordo con l'Eurocodice 3 e con Hancock e Wilkinson. Si ricorda che il motivo per cui sono state riportate entrambe deriva dal fatto che mentre il primo classifica di Classe 1 i profili che possiedono una capacità di rotazione  $R \geq 3$ , i secondi li considerano tali se hanno capacità di rotazione  $R \geq 4$ .

TEST	Profilo	F/FV	CF/HF	Materiale	$\varphi_{pl,teor}$	$\varphi_{pl, reale}$	$\varphi_{pl, ult}$	$\varphi_{av, teor}$	$R_{teor}$	EC3	Hanc.	$\varphi_{av, reale}$	$R_{reale}$	EC3	Hanc.
1	200-200-7	F	CF	S355JOH	0,45	0,45	5,56	5,11	11,36	1	1	5,11	11,36	1	1
2	100-100-8	F	HF	S355JOH	0,72	0,61	35,00	34,28	47,61	1	1	34,39	56,38	1	1
3	100-100-8	F	CF	S355JOH	0,72	0,96	35,00	34,28	47,61	1	1	34,04	35,46	1	1
4	200-100-12.5	FV	CF	S355J2H	0,52	0,96	35,00	34,48	66,31	1	1	34,04	35,46	1	1
5	100-100-10	F	CF	S355J2H	1,08	1,53	35,00	33,92	31,41	1	1	33,47	21,88	1	1
6	300-200-8	FV	CF	S355J2H	0,31	0,53	4,74	4,43	14,29	1	1	4,21	7,94	1	1
7	300-200-8	FV	CF	S355J2H	0,31	0,38	3,91	3,60	11,61	1	1	3,53	9,29	1	1
8	400-200-8	FV	CF	S355J2H	0,24	0,32	2,56	2,32	9,67	1	1	2,24	7,00	1	1
9	200-100-4	FV	CF	S355J2H	0,47	0,58	3,72	3,25	6,91	1	1	3,14	5,41	1	1
10	120-60-6	FV	CF	S355J2H	0,83	0,63	35,00	34,17	41,17	1	1	34,37	54,56	1	1
11	120-80-3	FV	CF	S355J2H	0,77	1,12	3,27	2,50	3,25	1	2	2,15	1,92	2	2
12	120-80-3	FV	CF	S355J2H	0,77	1,00	4,09	3,32	4,31	1	1	3,09	3,09	1	2
13	120-80-3	FV	CF	S355J2H	0,77	0,78	3,44	2,67	3,47	1	2	2,66	3,41	1	2
14	150-150-5	F	CF	S355J2H	0,61	0,91	6,63	6,02	9,87	1	1	5,72	6,29	1	1
15	150-150-5	F	HF	S355J2H	0,60	0,60	5,80	5,20	8,67	1	1	5,20	8,67	1	1
16	150-150-5	F	HF	S355J2H	0,60	0,95	4,69	4,09	6,82	1	1	3,74	3,94	1	2
17	200-200-8	F	CF	S355J2H	0,46	0,46	6,71	6,25	13,59	1	1	6,25	13,59	1	1
18	100-100-6	F	CF	S355J2H	0,94	0,77	35,00	34,06	36,23	1	1	34,23	44,45	1	1
19	250-150-5	FV	CF	S355J2H	0,37	0,90	2,62	2,25	6,08	1	1	1,72	1,91	2	2
20	250-150-5	FV	HF	S355J2H	0,37	0,37	2,87	2,50	6,76	1	1	2,50	6,76	1	1
21-AA	200x100x4	FV	CF	S355J2H	0,47	0,47	2,59	2,12	4,51	1	1	2,12	4,51	1	1
22-AE	200x100x8	FV	CF	S355JOH	0,49	0,67	13,00	12,51	25,53	1	1	12,33	18,40	1	1
23-R	150x100x3	F	CF	S355J2H	0,87	1,25	4,23	3,36	3,86	1	2	2,98	2,38	2	2
24-V	150x100x4	FV	CF	S355J2H	0,62	1,30	3,68	3,06	4,94	1	1	2,38	1,83	2	2
25-Z	200x100x4	F	CF	S355J2H	0,86	0,86	2,56	1,70	1,98	2	2	1,70	1,98	2	2
26-AV	70x70x3	F	CF	S355J2H	1,31	1,45	10,00	8,69	6,63	1	1	8,55	5,90	1	1
27-BI	100x100x4	F	CF	S355J2H	0,91	1,16	8,14	7,23	7,95	1	1	6,98	6,02	1	1
28-BH	100x100x5	F	CF	S355J2H	0,92	1,11	13,49	12,57	13,66	1	1	12,38	11,15	1	1
29-AZ	70x70x5	F	CF	S355J2H	1,35	2,10	25,00	23,65	17,52	1	1	22,90	10,90	1	1
30-BD	200x100x4	F	CF	S275JRH	0,67	1,36	2,26	1,59	2,37	2	2	0,90	0,66	2	2
31-BC	200x100x4	F	CF	S275JRH	0,67	2,34	2,96	2,29	3,42	1	2	0,62	0,26	2	2
32-BF	120x60x6	FV	CF	S355JOH	0,82	0,82	25,00	24,18	29,49	1	1	24,18	29,49	1	1
33-BL	120x60x6	F	CF	S355JOH	1,51	1,97	25,00	23,49	15,56	1	1	23,03	11,69	1	1
34-AR	100x100x8	F	HF	S355J2H	0,95	2,03	50,00	49,05	51,63	1	1	47,97	23,63	1	1
35-AT	100x100x8	F	CF	S355J2H	0,95	1,26	30,00	29,05	30,58	1	1	28,74	22,81	1	1
36-AS	100x100x8	F	CF	S355J2H	0,95	1,10	30,00	29,05	30,58	1	1	28,90	26,27	1	1
37-AU	100x100x8	F	CF	S355J2H	0,95	0,95	23,00	22,05	23,21	1	1	22,05	23,21	1	1
38-BA	80x80x5	F	CF	S235JRH	0,77	0,77	25,00	24,23	31,47	1	1	24,23	31,47	1	1
39-BB	80x80x5	F	CF	S235JRH	0,77	0,77	21,00	20,23	26,27	1	1	20,23	26,27	1	1
40-BE	200x100x8	F	CF	S355JOH	0,89	1,45	13,47	12,58	14,13	1	1	12,02	8,29	1	1

**Tab. 6.1** Valori della capacità di rotazione teorica e reale dei profili

L'analisi dei risultati ha portato ad esprimere la capacità di rotazione  $R = R(\lambda_w, \lambda_f)$  non più in funzione della snellezza minore tra quelle degli elementi che compongono il profilo, flangia o anima, ma sulla base di una snellezza complessiva del profilo definita come:

$$(6.1) \quad \lambda_s = \sqrt{\lambda_f^2 + \lambda_w^2}$$

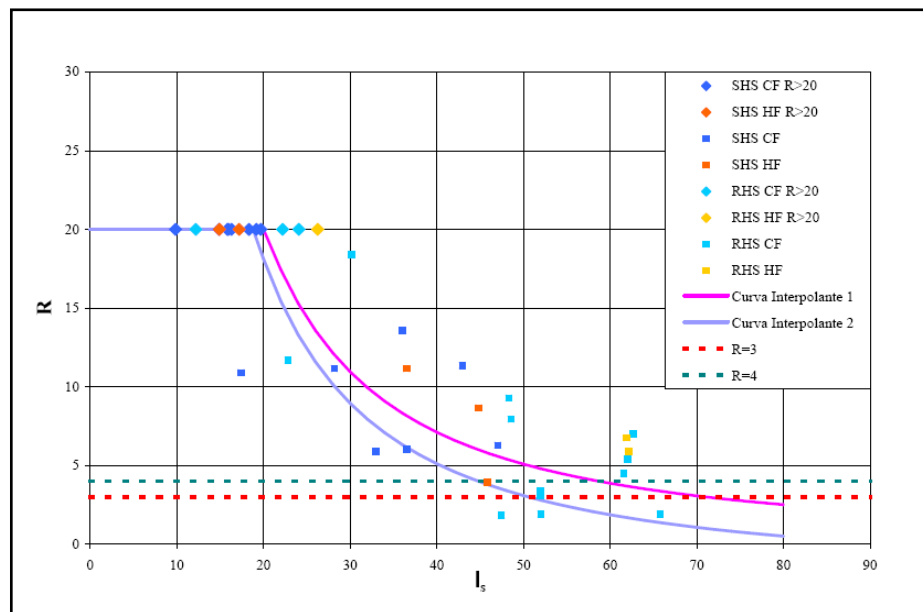
L'elaborazione dei risultati ha portato a formulare la seguente espressione della capacità di rotazione:

$$(6.2) \quad R(\lambda_s) = \min(20, 1800 \lambda_s^{-1.5})$$

Al fine della classificazione dei profili si è quindi utilizzato la seguente espressione, in grado di offrire una maggiore copertura dei risultati effettivi:

$$(6.3) \quad R(\lambda_s) = \min[20, (1800 \lambda_s^{-1.5} - 2)]$$

La fig. 6.7 mostra il confronto delle due curve  $R(\lambda_s)$  con i dati sperimentali disponibili.

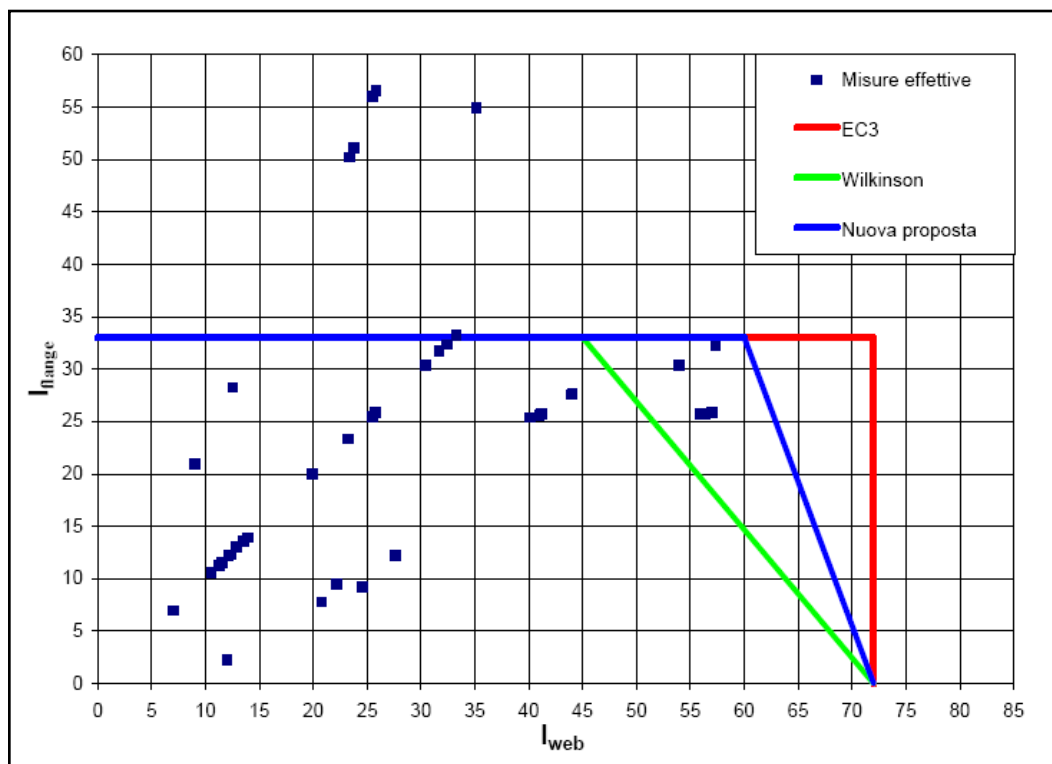


**Tab. 6.7** Rappresentazione di  $R(\lambda_s)$  di tutti i profili

Le curve rappresentate in tale diagramma hanno fornito uno strumento valido per l'individuazione dei limiti della Classe 1 ai profili CF e HF.

I risultati sopra ottenuti, nonché studi analoghi come quelli di Hancock e Wilkinson, hanno suggerito di ridurre l'estensione del campo caratteristico della Classe 1.

La fig. 6.8 mostra, sul piano ( $\lambda_w - \lambda_f$ ), l'individuazione di tali limiti secondo le diverse proposte.



**Tab. 6.8** Individuazione dei limiti ( $\lambda_w - \lambda_f$ ) secondo le diverse proposte

Durante la descritta fase di ricerca si è giunti alle seguenti conclusioni:

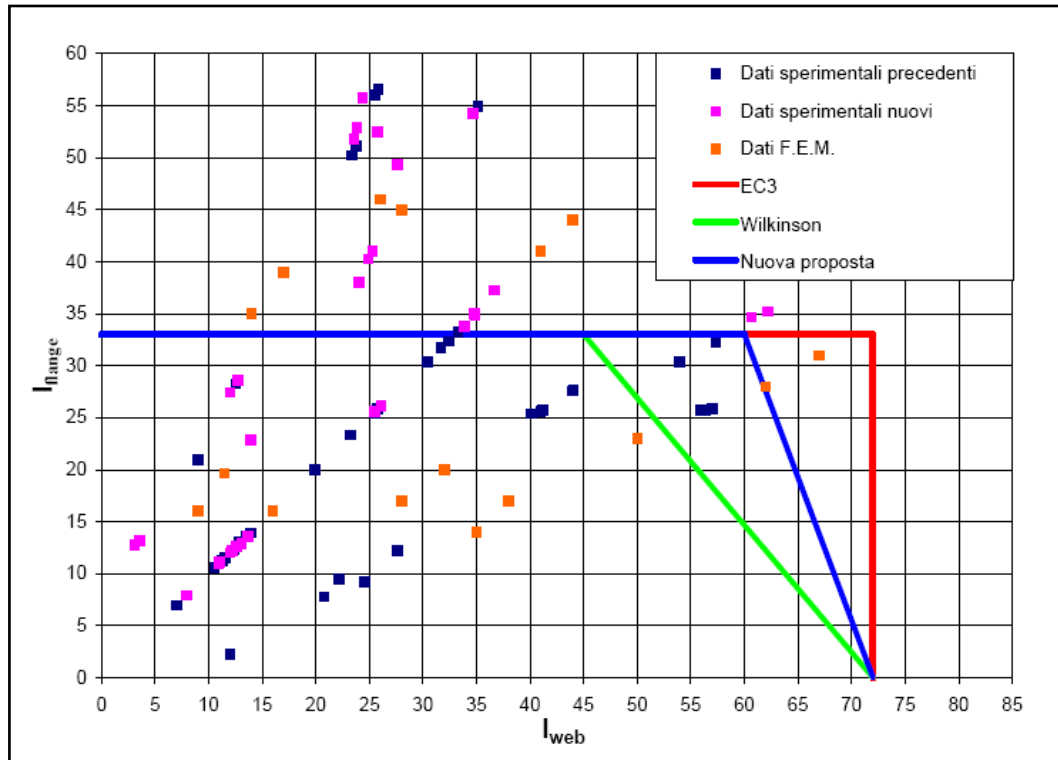
- ✓ I comportamenti sperimentali dei profili formati a caldo e a freddo, in termini di andamento delle curve momento – rotazione, differiscono tra loro in maniera non significativa; i secondi però presentano dei carichi ultimi sensibilmente più alti di quelli nominali, a causa delle proprietà che la lavorazione conferisce al materiale.
- ✓ La classificazione secondo l'Eurocodice 3 dei profili cavi risulta generalmente soddisfacente.
- ✓ La classificazione secondo Hancock e Wilkinson, che tiene conto della dipendenza tra la snellezza della flangia  $\lambda_f$  e quella dell'anima  $\lambda_w$ , è cautelativa.

- ✓ Una buona stima della capacità di rotazione reale è data dalla curva interpolante definita dalla (6.2).
- ✓ Allo scopo di consentire una classificazione dei profili, una stima soddisfacente della capacità di rotazione si può ottenere utilizzare l'espressione 6.3.

### **6.3 Risultati dell'attuale fase di sperimentazione**

Come descritto nel Capitolo 5, durante lo svolgimento della seguente tesi sono stati eseguiti i test identificati dal n°41 al n°71; ciò ha permesso di avere a disposizione, insieme a quelli precedentemente ottenuti, una buona quantità di dati da poter elaborare.

I profili considerati nel presente studio, per semplificare la lettura dei risultati, sono stati individuati in funzione della snellezza dell'anima e della flangia ( $\lambda_w$   $\lambda_f$ ); ciò è mostrato in fig. 6.9.



**Fig. 6.9** Individuazione dei profili attraverso le snellezze  $\lambda_w$  e  $\lambda_f$

Nella Tabella 6.2 sono riportati, per i profili oggetto di studio, i valori della capacità di rotazione teorica e reale e la classificazione sia nominale che teorica secondo l'Eurocodice 3 e secondo Hancock Wilkinson, analogamente a quanto fatto nella Tabella 6.1 per i profili della prima parte della campagna sperimentale.

TEST	Profilo	F/FV	CF/HF	Materiale	$\varphi_{pl,teor}$	$\varphi_{pl,reale}$	$\varphi_{pl,ult}$	$\varphi_{av,teor}$	$R_{teor}$	EC3	Hanc.	$\varphi_{av,reale}$	$R_{reale}$	EC3	Hanc.
41-A	100x100x8	F	HF	S355	0,95	1,62	35,00	34,05	35,77	1	1	33,38	20,63	1	1

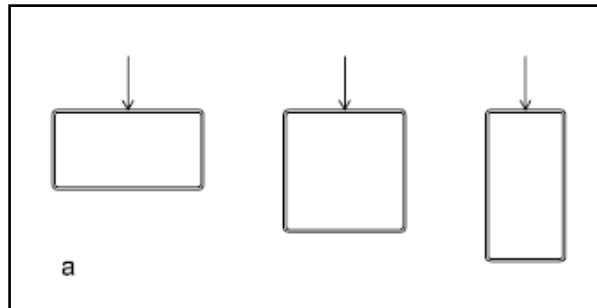
42-B	100x100x8	F	HF	S355											
43-C	100x100x8	F	HF	S355	0,95	1,51	35,00	34,05	35,76	1	1	33,49	22,22	1	1
44-D	150x150x5	F	CF	S355 J2H	0,60	1,33	4,62	4,01	6,66	1	1	3,28	2,46	2	2
45-E	150x150x5	F	CF	S355 J2H	0,60	1,32	5,61	5,00	8,29	1	1	4,29	3,24	1	2
46-F	150x150x5	F	CF	S355 J2H											
47-G	150x150x12	F	HF	S355 J2H	0,64	1,27	35,00	34,37	54,12	1	1	33,73	26,45	1	1
48-H	150x150x12	F	HF	S355 J2H	0,63	1,33	35,00	34,37	54,15	1	1	33,67	25,35	1	1
49-I	150x150x12	F	HF	S355 J2H	0,65	0,89	35,00	34,35	53,02	1	1	34,11	38,43	1	1
50-L	200x200x8	F	CF	S355 J2H	0,46	0,79	8,12	7,66	16,76	1	1	7,33	9,34	1	1
51-M	200x200x8	F	CF	S355 J2H	0,46	0,85	8,65	8,19	17,92	1	1	7,80	9,21	1	1
52-N	50x50x3	F	HF	S235 JRH	1,23	1,35	35,00	33,77	27,46	1	1	33,65	24,93	1	1
53-O	50x50x6	F	CF	S355 J2H	2,05	3,32	35,00	32,95	16,07	1	1	31,68	9,55	1	1
54-P	80x80x5	F	HF	S235 JRH	0,78	0,96	35,00	34,22	44,14	1	1	34,04	35,27	1	1
55-Q	120x80x6	F	HF	S355 JOH	1,14	1,68	35,00	33,86	29,64	1	1	33,32	19,89	1	1
56-S	150x100x3	FV	CF	S355 J2H	0,87	1,43	5,24	4,37	5,01	1	1	3,81	2,66	2	2
57-T	150x100x4	F	CF	S355 J2H	0,88	-	-	-	-	3	3	-	-	3	3
58-U	150x100x4	F	CF	S355 J2H	0,88	0,69	3,21	2,33	2,64	2	2	2,52	3,67	1	2
59-AB	200x100x4	F	HF	S275 JR	0,67	-	-	-	-	3	3	-	-	3	3
60-AC	200x100x8	F	HF	S355 JOH	0,90	1,59	13,40	12,49	13,82	1	1	11,81	7,43	1	1
60AD	200x100x8	F	HF	S355 JOH	0,90	1,49	20,00	19,10	21,20	1	1	18,51	12,43	1	1
62-AF	200x100x12.5	F	CF	S355 J2H	0,96	1,82	35,00	34,04	35,50	1	1	33,18	18,22	1	1
63-AG	200x100x12.5	FV	CF	S355 J2H	0,96	1,56	35,00	34,04	35,51	1	1	33,44	21,48	1	1
64-AH	250x150x5	F	CF	S275 JOH	0,45	0,13	3,88	3,43	7,65	1	1	3,75	27,94	1	1
65-AI	250x150x5	F	CF	S275 JOH	0,45	0,97	6,20	5,75	12,82	1	1	5,24	5,42	1	1
66-AL	250x150x5	FV	CF	S355 J2H											
67-AM	250x150x5	FV	CF	S355 J2H	0,37	0,82	2,48	2,11	5,62	1	1	1,66	2,02	2	2
68-AN	300x200x8	F	CF	S355 J2H	0,44	0,96	5,81	5,37	12,16	1	1	4,85	5,05	1	1
69-AO	400x200x8	F	CF	S355 J2H	0,43	0,95	3,10	2,67	6,16	1	1	2,15	2,28	2	2
70-AP	400x200x8	F	CF	S355 J2H	0,43	0,94	2,94	2,50	5,78	1	1	2,00	2,12	2	2
71-AQ	100x100x3	F	CF	S355 J2H	0,90	1,61	3,63	2,73	3,03	1	2	2,02	1,25	2	2

**Tab. 6.2** Valori della capacità di rotazione teorica e reale dei profili studiati nella presente tesi



A questo punto si è ritenuto opportuno sviluppare gli aspetti affrontati in questo capitolo sulla base, oltre che sull'elaborazione dei dati ottenuti sperimentalmente, delle seguenti considerazioni riguardo i risultati precedentemente ottenuti:

- ✓ L'attuale formulazione della capacità di rotazione riportata al paragrafo precedente, essendo indipendente dal rapporto  $d/b$ , ossia  $\lambda_w / \lambda_f$ , assegna ad un profilo RHS la stessa capacità rotazionale per la flessione secondo i due piani principali di simmetria della sezione trasversale, fig. 6.10.



**Fig. 6.10** Profili con la stessa capacità rotazionale nei due piani principali

- ✓ La stessa espressione, pur consentendo in generale una buona valutazione della capacità di rotazione, in realtà approssima lievemente in difetto i valori relativi al campo dei profili con rapporti  $\lambda_w / \lambda_f$  elevati, e sovrastima eccessivamente quella dei profili con valori modesti dello stesso rapporto.
- ✓ Nel fissare i limiti di snellezza per la classificazione si prendono in considerazione in modo interagente le snellezze di flangia e anima, di fatto, soltanto per i profili aventi  $\lambda_f > 60$ .
- ✓ I profili con piccoli rapporti  $\lambda_w / \lambda_f$  ( $= 1/2$ ) e snellezza della flangia vicina al limite suggerito presentano, nella realtà, una capacità rotazionale  $R \geq 3$ .

Al fine di riuscire a cogliere gli aspetti sopra riportati e nell'ottica di ottenere un'espressione semplice della capacità di rotazione, si è proceduto secondo quanto segue.

Le dimensioni commerciali dei profili RHS sono generalmente caratterizzate dai seguenti valori del rapporto  $d/b$ :  $d/b = 0,5$ ,  $d/b = 1$  e  $d/b = 2$ ; nel piano  $\lambda_w - \lambda_f$  i punti caratteristici dei profili commerciali sono quindi situati lungo le rette  $\lambda_f = 0,5 \lambda_w$ ,  $\lambda_f = \lambda_w$ ,  $\lambda_f = 2 \lambda_w$ .

Per quanto detto , in un primo momento, si è limitata l'indagine della funzione  $R=R(\lambda_w, \lambda_f)$  al dominio  $\lambda_f = 0,5 \lambda_w, \lambda_f = \lambda_w, \lambda_f = 2 \lambda_w$ .

Sulla base delle considerazioni appena svolte, facendo riferimento alla definizione di  $\lambda_s$  data nel paragrafo precedente, si è ricorsi alla rappresentazione  $R=R(\lambda_s)$  ottenendo come ci attendevamo, tre curve di interpolazione distinte.

L'idea iniziale, per cogliere il differente comportamento delle tre categorie di profili, è stata quella di introdurre una nuova definizione della snellezza del profilo; tale definizione è data dall'espressione:

$$(6.4) \quad \lambda_s = \sqrt{\lambda_f^2 + \alpha \lambda_w^2}$$

dove  $\alpha=\alpha(\lambda_w/\lambda_f)$  è un parametro che ha lo scopo di cogliere l'influenza che ha il rapporto di forma del profilo.

L'analisi di dati sperimentali ha portato a ritenere che, nel campo  $1/3 < \lambda_w/\lambda_f < 3$ , il coefficiente  $\alpha$  possa essere assunto , in modo continuo, con un valore pari a :

$$\alpha\left(\lambda_w/\lambda_f\right) = \frac{\lambda_f}{\lambda_w}$$

Sostituendo tale rapporto nell'espressione (6.4) e mettendo in evidenza  $\lambda_f$  si ha:

$$\lambda_s = \sqrt{1 + \frac{\lambda_w}{\lambda_f}} \lambda_f$$

La rielaborazione di tutti i dati a disposizione, attraverso l'attuale assunzione, ha portato alla seguente espressione della capacità di rotazione:

$$(6.5) \quad R(\lambda_s) = \min(20,7300 \lambda_s^{-1,95})$$

Per la classificazione dei profili, al fine di garantire una maggiore copertura dei risultati effettivi, si ritiene opportuno far riferimento alla seguente espressione:

$$(6.6) \quad R(\lambda_s) = \min[20, (7300 \lambda_s^{-1.95} - 1)]$$

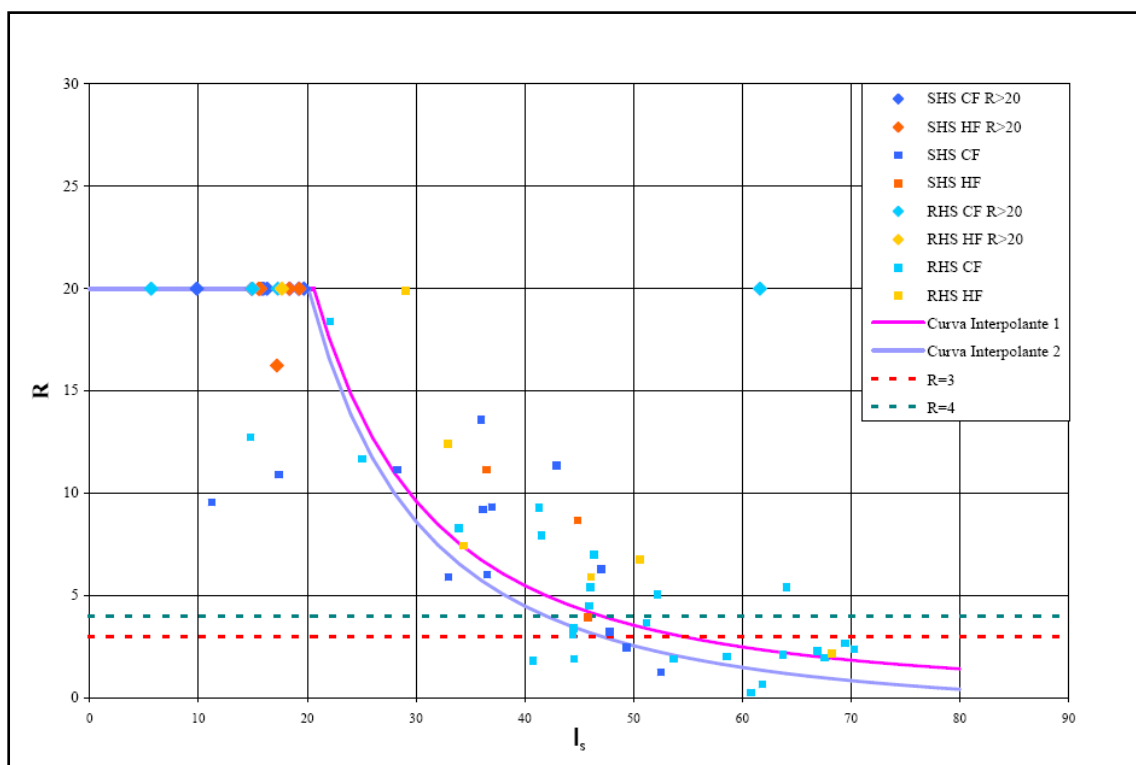
Il dominio di Classe 1 può essere quindi rappresentato attraverso l'espressione:

$$(6.7) \quad \lambda_f(\lambda_f + \lambda_w) \leq 2212$$

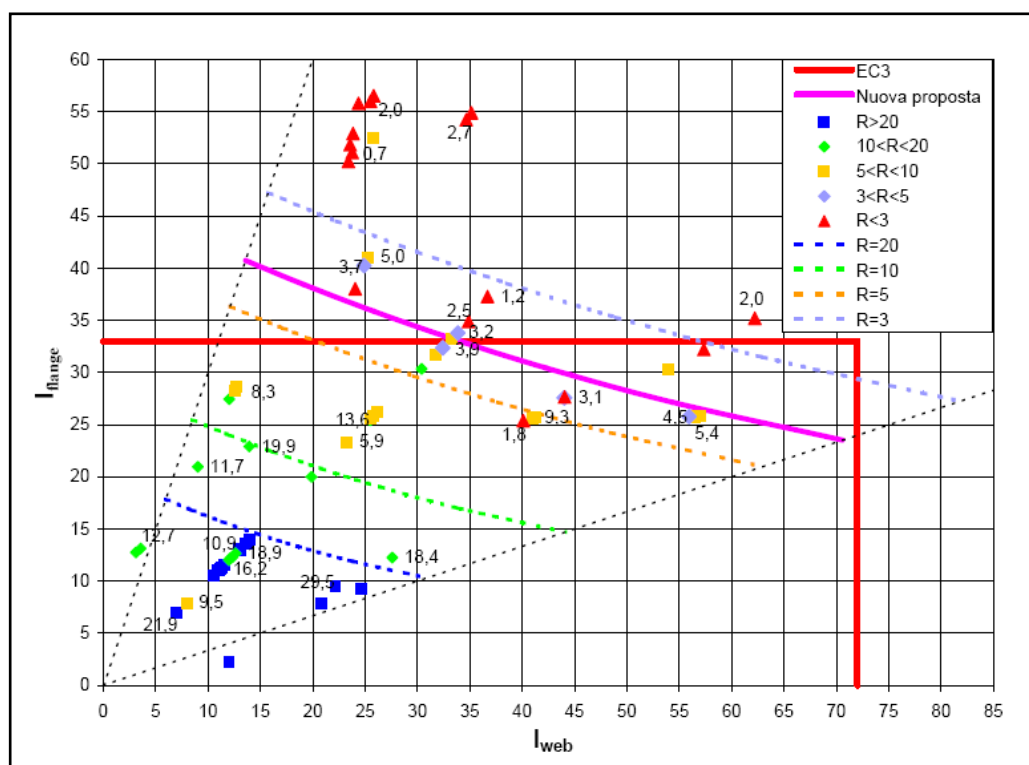
L'attuale formulazione, come di seguito illustrato, conduce ad una maggior coerenza con i risultati sperimentali.

Nelle Tabelle 6.3, 6.4, 6.5 e 6.6 è riportato il confronto tra i risultati ottenuti dalle indagini sperimentali e quelli derivanti dalla nuova formulazione.

Nella fig. 6.11 è mostrato il confronto dei dati sperimentali con la curva  $R(\lambda_s)$ ; la fig. 6.12 visualizza invece come le curve di isorotazione, ricavate dall'espressione (6.5), approssimino in modo soddisfacente i dati suddivisi per intervalli di capacità rotazionale. Nella stessa figura è riportato il limite del dominio di Classe 1, secondo la formula (6.7), per il campo commerciale dei profili RHS.



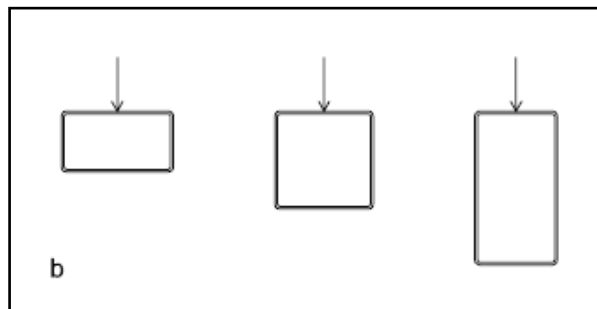
**Fig. 6.11** Rappresentazione di  $R(\lambda_s)$  di tutti i profili



**Fig. 6.12** Curve di isotorsione e limiti del dominio di Classe 1

I vantaggi derivanti dall'attuale formulazione sono in conclusione:

- ✓ Essendo la snellezza del profilo  $\lambda_s$  dipendente dal rapporto  $\lambda_w / \lambda_f$  (cioè  $d/b$ ), si evince che uno stesso profilo RHS presenta differenti capacità di rotazione per flessione secondo i due piani di simmetria della sezione trasversale. La fig. 6.13 permette di avere un'idea di quali sono i rapporti tra profili dotati della medesima capacità rotazionale.



**Fig. 6.13** Profili con la stessa capacità rotazionale

- ✓ La stessa espressione (6.6) consente una buona valutazione della capacità di rotazione in tutto il campo di profili aventi  $1/3 < \lambda_w / \lambda_f < 3$ .
- ✓ La possibilità di ricavare delle curve di isorotazione rappresenta un valido strumento per l'individuazione dei limiti della Classe dei profili CF e HS.
- ✓ La classificazione prende in considerazione il fatto che, in tutto il campo dei profili commerciali,  $1/3 < \lambda_w / \lambda_f < 3$ , le snellezze dell'anima e della flangia concorrono in modo interagente nella determinazione della capacità rotazionale dei profili.
- ✓ La classificazione coglie il fatto che i limiti di snellezza indicati dall'Eurocodice 3, i quali si ricorda sono i risultati di prove e studi eseguiti su profili a I, risultano essere cautelativi per i profili aventi modesti valori del rapporto  $d/b$  ( $d/b = 1/2$ ) e non cautelativi per valori elevati dello stesso rapporto ( $d/b = 2$ ).

## **7- ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI**

### **7.1 Generalità**

I programmi agli elementi finiti hanno avuto grande divulgazione solo a partire dagli anni '80; nel decennio precedente, infatti, pur essendo già presenti sul mercato, la scarsa disponibilità di mezzi di calcolo e la difficoltà nel loro uso hanno fatto sì che la diffusione fosse limitata.

In passato il ragionamento su cui si basava la progettazione prevedeva di passare dal discreto al continuo, con l'avvento dei programmi agli elementi finiti siamo passati all'esatto opposto, ovvero al passaggio dal continuo al discreto.

In pratica questo metodo consiste nel dividere un corpo continuo in tanti piccoli elementi connessi solo nei nodi. L'uso delle generiche parole “tanti” e “piccoli” trova giustificazione nel fatto che il numero di elementi e le loro dimensione non seguono una regola fissa, ma cambiano a seconda del tipo di struttura che dobbiamo analizzare, quello che non varia è lo scopo di rendere il modello il più preciso possibile.

L'ipotesi base su cui si fonda un modello agli elementi finiti è che gli spostamenti di tutti i punti appartenenti agli elementi varino ad esempio con legge lineare o con legge parabolica cioè, in generale, che seguano una ben definita legge matematica.

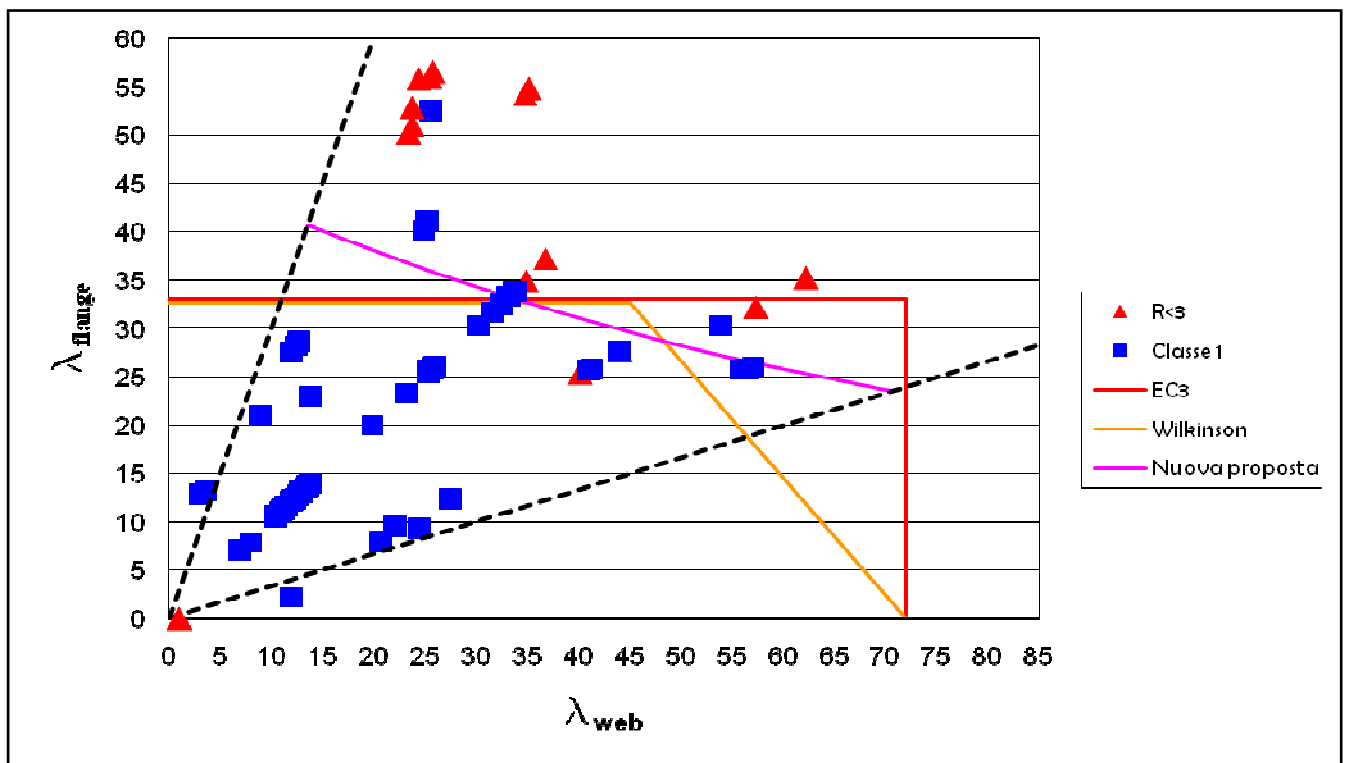
Questo tipo di analisi si avvicina molto al così detto metodo dell'interpolazione con la differenza di poter in questo caso scegliere liberamente i punti ove campionare la funzione incognita.

Nella seguente tesi per eseguire la modellazione agli elementi finiti è stato utilizzato il programma COSMOS.

## 7.2 Scelta dei modelli

Al fine di integrare i risultati ottenuti dalla campagna sperimentale, Capitolo 5, in termini di diagrammi momento – rotazione, nella presente tesi sono stati realizzati, mediante il software COSMOS, otto modelli agli elementi finiti di profili RHS simili a quelli testati.

Le loro dimensioni trasversali sono state scelte cercando di completare il diagramma di fig. 7.1, ovvero in base alle snellezze dell'anima e della flangia.

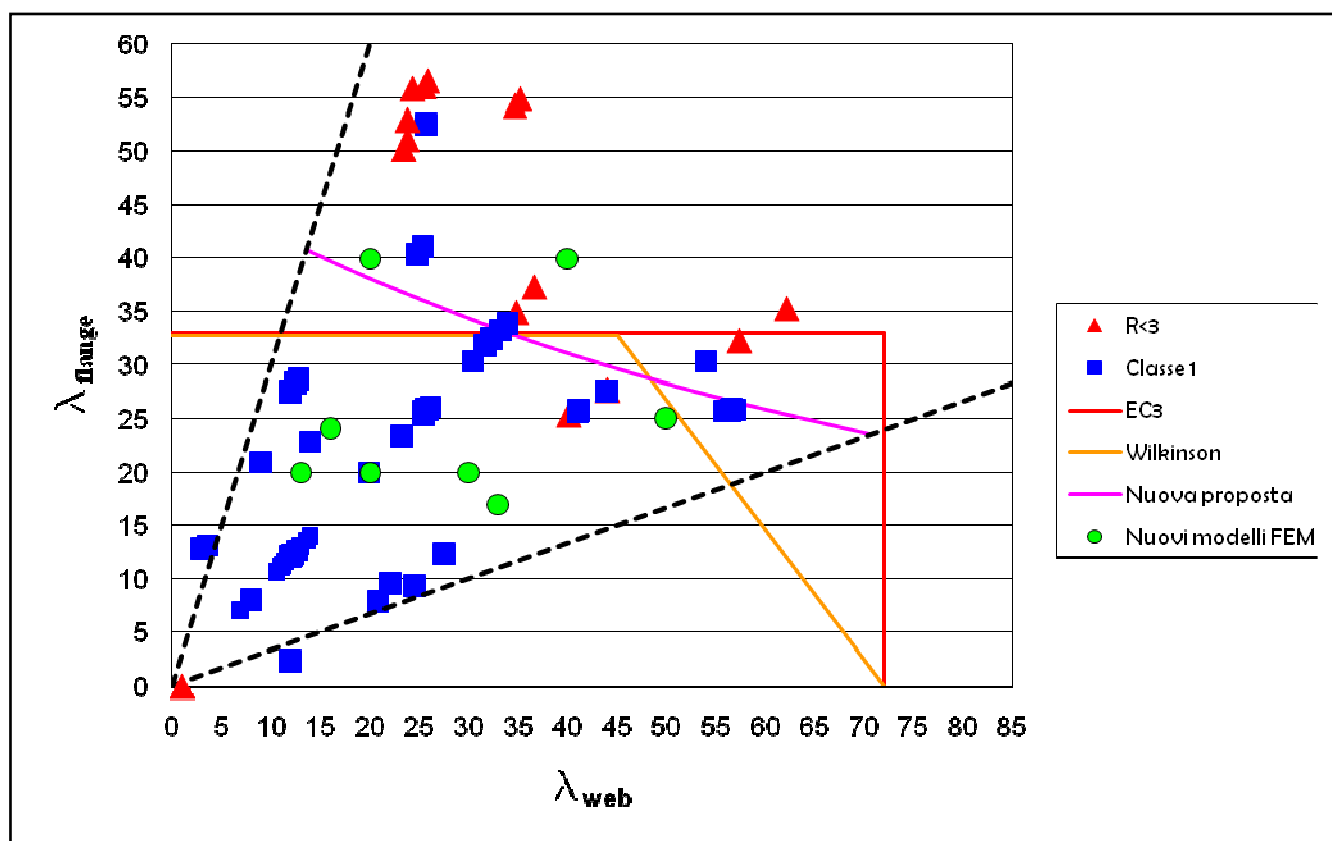


**Fig. 7.1** Individuazione dei profili attraverso le snellezze  $\lambda_w$  e  $\lambda_f$

Nella tabella 7.1 sono riportate le caratteristiche geometriche dei profili scelti con le rispettive snellezze, sia dell'anima che della flangia, mentre nella fig. 7.2 è indicato dove tali punti si collocano nel diagramma di fig. 7.1.

PROFILO	DIMENSIONI[mm]	POSIZIONE	$\lambda_f$	$\lambda_w$
1	200x100x5	F	40	20
2	200x100x6	FV	17	33
3	150x100x5	FV	20	30
4	100x100x5		20	20
5	120x80x5	F	24	16
6	200x200x5		40	40
7	200x100x4	FV	25	50
8	120x80x6	F	20	13

**Tab. 7.1** Profili scelti per la modellazione



**Fig. 7.2** Collocazione dei profili scelti per la modellazione

### 7.3 Sintesi del procedimento di modellazione



Vediamo ora, in generale, uno schema del procedimento utilizzato per realizzare, mediante COSMOS, i modelli agli elementi finiti dei profili RHS oggetto della seguente tesi. La prima operazione consiste nel realizzare la geometria dell'oggetto; per far ciò sono state per prima cosa inserite le dimensioni trasversali della sezione, considerando quelle medie ottenute dalle misurazioni effettuate in fase sperimentale, e successivamente quelle longitudinali. Per quanto riguarda quest'ultime il profilo è stato disegnato nella sua interezza, non avvalendosi di simmetrie che avrebbero snellito l'analisi ma diminuito la sua precisione.

Tenendo poi conto del fatto che la snellezza e la configurazione di partenza della flangia superiore sono le caratteristiche generalmente responsabili dell'inizio della formazione della bozza causa dell'incipiente abbassamento del momento e dell'avvio del ramo discendente nel diagramma momento-rotazione, nella configurazione iniziale è stata inserita l'imperfezione relativa alla flangia superiore nella mezzeria del profilo misurata in laboratorio (vedi paragrafo 5.3).

Una volta immessa nel programma la geometria del corpo, il passo successivo è stato quello di scegliere il più opportuno modello matematico a cui far riferimento; la bontà di tale modello trova riscontro nei risultati sperimentali.

Un parametro molto importante di cui è stato tenuto conto per effettuare tale scelta è la valutazione di come il comportamento strutturale e la capacità di rotazione del profilo RHS siano influenzati dalle variazioni delle proprietà meccaniche dell'acciaio lungo il perimetro della sezione. A questo proposito studi precedenti hanno esaminato l'influenza sui risultati numerici della forma della vera curva tensione-deformazione, della distribuzione delle proprietà meccaniche lungo la sezione trasversale e quella che ha un'imperfezione di planarità, iniziale, della flangia compressa; i risultati ottenuti hanno portato alla conclusione che si poteva considerare un materiale medio rappresentativo su tutta la sezione trasversale, ma che, assumendo un materiale per le flange ed uno per gli angoli i risultati sarebbero stati migliori.

Proprio per quanto detto nei modelli realizzati sono state introdotte due diverse curve tensione-deformazione.

A questo punto si è proceduto con la definizione della Mesh, cioè con la vera e propria suddivisione del continuo.

Gli elementi in cui è stato suddiviso il profilo sono stati schematizzati come piastre attraverso l'impiego di elementi shell a quattro nodi (SHELL 4T della libreria di COSMOS); in questa fase sono state anche inserite opzioni del programma che prevedono:

- controllo di spostamento mediante autostep;
- interazione eseguita con il metodo di Newton-Raphson;
- criterio di plasticità utilizzato tipo Von Mises cinematico;
- legame costitutivo non lineare.

Il passo successivo, nonché l'ultimo prima di far eseguire al programma l'analisi vera e propria, è stato quello di definire i vincoli ed i carichi agenti sulla struttura.

Lo schema statico della prova eseguita in laboratorio (vedi paragrafo 5.4) è quello di trave semplicemente appoggiata, quindi i vincoli inseriti nel piano di flessione sono da un lato di semplice appoggio e dall'altro di cerniera; per quanto riguarda invece il piano trasversale sono stati inseriti degli incastri.

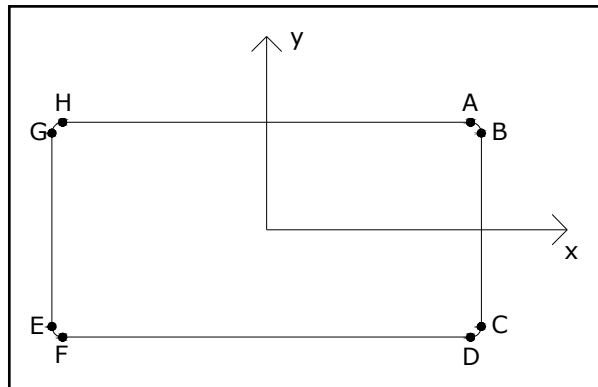
I carichi, come vedremo dopo, sono stati applicati in modo da riprodurre nel modo più fedele le condizioni di laboratorio.

## 7.4 Modellazione di un profilo RHS

In questo paragrafo è riportato passo per passo e più nel dettaglio il procedimento utilizzato per realizzare, tramite il programma agli elementi finiti COSMOS, il modello del profilo n°1 della Tabella 7.1, il quale ha dimensioni pari a 200mmx100mmx5mm e acciaio tipo S275.

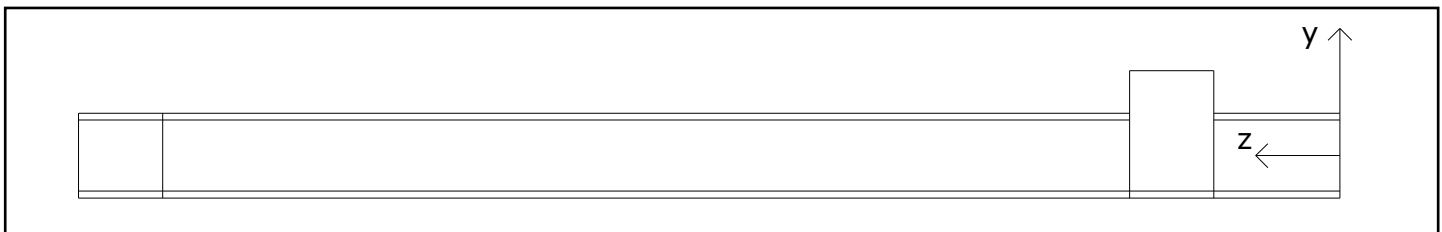
### 7.4.1 Realizzazione della geometria

La prima operazione, come detto precedentemente, è stata quella di realizzare la geometria del profilo. Per farlo sono state inserite le coordinate di otto punti del contorno, indicati con le lettere A-H nella fig. 7.3



**Fig. 7.3** Sezione trasversale

che uniti attraverso “curve” e “archi” hanno dato forma alla sezione trasversale del tubo. Fatto questo, attraverso i comandi “extrude” e “simmetry” sono state create le superfici che formano la sezione longitudinale, fig. 7.4; infine, realizzato il tubo nella sua interezza sono stati disegnati i piatti utilizzati in laboratorio per l'applicazione dei carichi.



**Fig. 7.4** Sezione longitudinale

### 7.4.2 Proprietà dei materiali

Come detto in precedenza, per costruire un modello quanto più possibile vicino alla realtà è necessario inserire due diverse curve tensione-deformazione, una per le flange ed una per gli angoli; per far questo il programma richiede di impostare due diversi materiali, “MP1” e “MP2”, a cui in questa fase sono state date le medesime caratteristiche:

- Modulo elastico dell'acciaio  $E=2060000 \text{ daN/cm}^2$
- Coefficiente di Poisson  $\nu = 0,3$
- Densità dell'acciaio  $\rho = 7850 \text{ N/mm}^3$

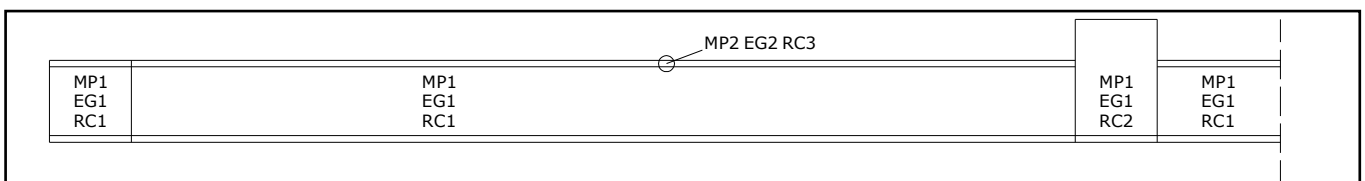
#### 7.4.3 Definizione delle caratteristiche degli elementi

Ad entrambi i materiali è stato associato un “element group” “EG1” ed “EG2”, il quale rappresenta il tipo di elemento con cui successivamente verrà eseguita la mesh del corpo, in questo caso la scelta è ricaduta, sia per le flange che per gli angoli su elementi shell 4T, ovvero elementi piastra a quattro nodi.

Il programma richiedeva inoltre di definire i “real constant” (“RC”), ovvero di assegnare uno spessore agli elementi, nel nostro caso ne sono stati definiti tre, uno per le flange, uno per gli angoli (il valore dello spessore è uguale ma si riferisce ad EG diversi) ed uno per la zona di flangia dove sono stati posizionati i piatti.

#### 7.4.4 Pianificazione della Mesch

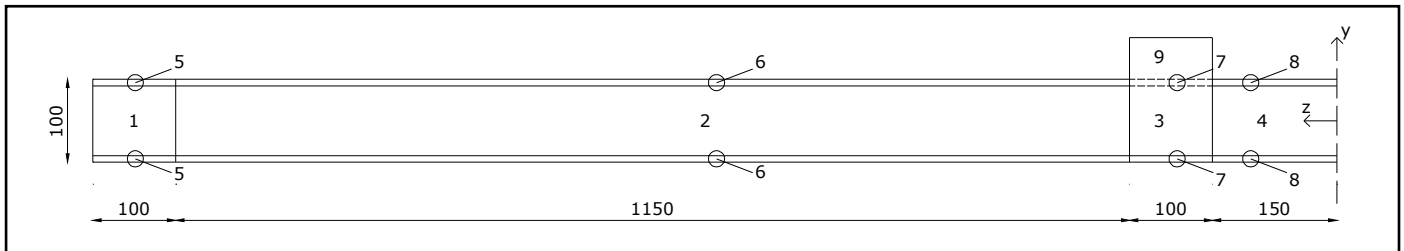
Scelti gli elementi siamo passata a realizzare la mesh sulle superfici che formano il profilo facendo attenzione a impostare i giusti MP,EG e RC a seconda di quella considerata. Nella fig. 7.5 è riportato uno schema della corrispondenza tra caratteristiche degli elementi e superfici (la figura mostra metà tubo avvalendosi della simmetria).



**Fig. 7.5** Corrispondenza tra MP,EG,RC e superfici

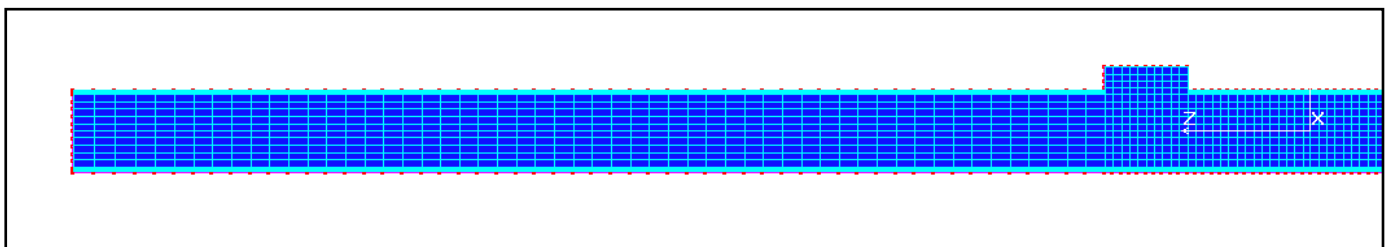
Per quanto riguarda il numero di shell abbiamo proceduto pensando di dividere il corpo in elementi aventi dimensioni decrescenti dal centro verso gli estremi, in quanto la zona per noi di maggior interesse risulta essere proprio quella di mezzeria.

Al fine di chiarire quanto detto riportiamo la suddivisione di una parte del tubo in oggetto in zone, fig. 7.6, il numero di elementi per ogni zona, Tabella 7.2, ed il risultato su COSMOS, fig. 7.7.



**Fig. 7.6** Suddivisione in zone

Zona	Elementi lungo y	Elementi lungo z
1	10	4
2	10	50
3	10	10
4	10	15
5	4	4
6	4	50
7	4	10
8	4	15
9	4	10

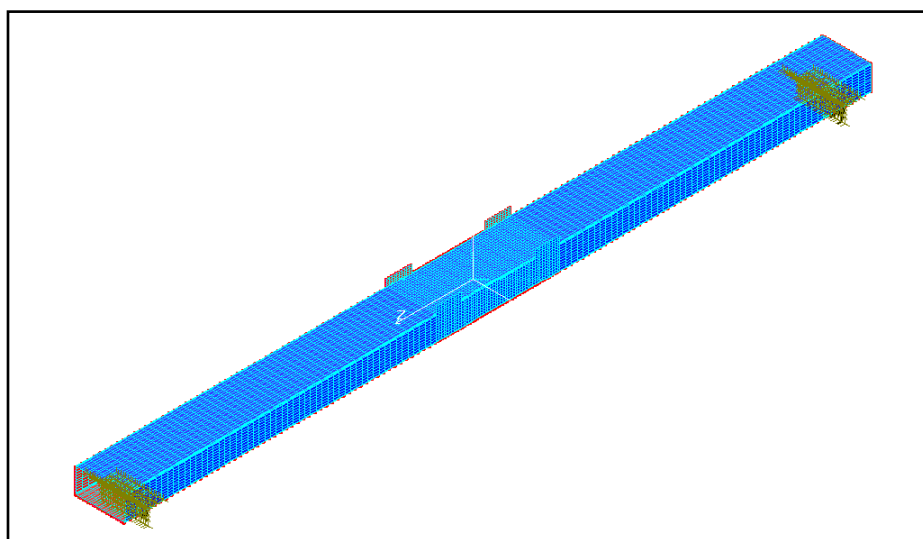


**Tab.7.2** Numero di elementi per ogni zona

**Fig.7.7** Mesh tubo

#### 7.4.5 Definizione dei vincoli

La tipologia di inserimento dei vincoli è stata quella che prevede di bloccare o mantenere liberi i sei movimenti del nodo. Nel modello in oggetto sono stati bloccati da una parte tutti i sei movimenti ad eccezione della rotazione intorno all'asse "x"; dall'altra invece i sei movimenti lasciati liberi di esplicarsi sono stati di nuovo la rotazione intorno a "x" ed in più la traslazione lungo l'asse "z". I nodi vincolati sono a 100mm dagli estremi nella parte inferiore del tubo, fig. 7.8, avendo ritenuto questo schema quello più attinente alla realtà di laboratorio, fig. 7.9.



**Fig. 7.8** Schema statico nel modello



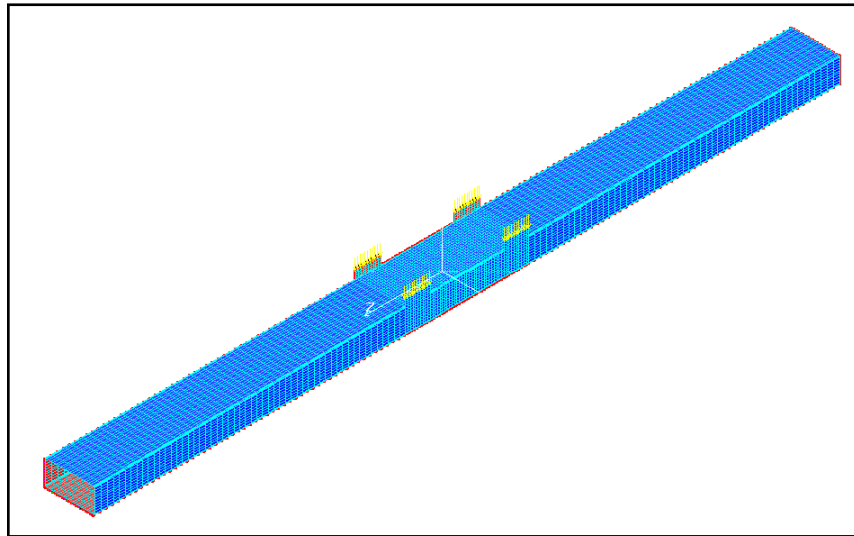
**Fig.7.9** Schema statico in laboratorio

#### 7.4.6 Inserimento dei carichi

Questa fase della modellazione si divide in due parti, la prima prevede l'inserimento di una forza verticale verso il basso nel nodo in mezzzeria del profilo al fine di imprimergli un difetto, la seconda l'inserimento delle forze che schematizzano la condizione di carico utilizzata in fase sperimentale.

Per assegnare l'imperfezione è stata prima posizionata una forza pari a 35.000N e dopo è stata eseguita un'analisi statica con il risultato di aver creato un difetto nel centro del tubo pari a 0,861mm.

A questo punto tale forza è stata rimossa e sono state inserite quelle rappresentanti lo schema di carico di laboratorio al fine di eseguire l'analisi non lineare; queste forze sono state posizionate sui nodi presenti alle estremità dei piatti con un'intensità pari a 1 ad eccezione delle due di bordo che valgono 0,5, fig. 7.10.



**Fig.7.10** Schema di carico nel modello

#### 7.4.7 Inserimento delle curve tensione - deformazione

Una volta posizionate le forze, prima di eseguire l'analisi non lineare, abbiamo inserito le due curve tensione-deformazione; tali curve sono state ricavate da prove di trazione eseguite su elementi appartenenti a profili di spessore uguale a quello in oggetto.

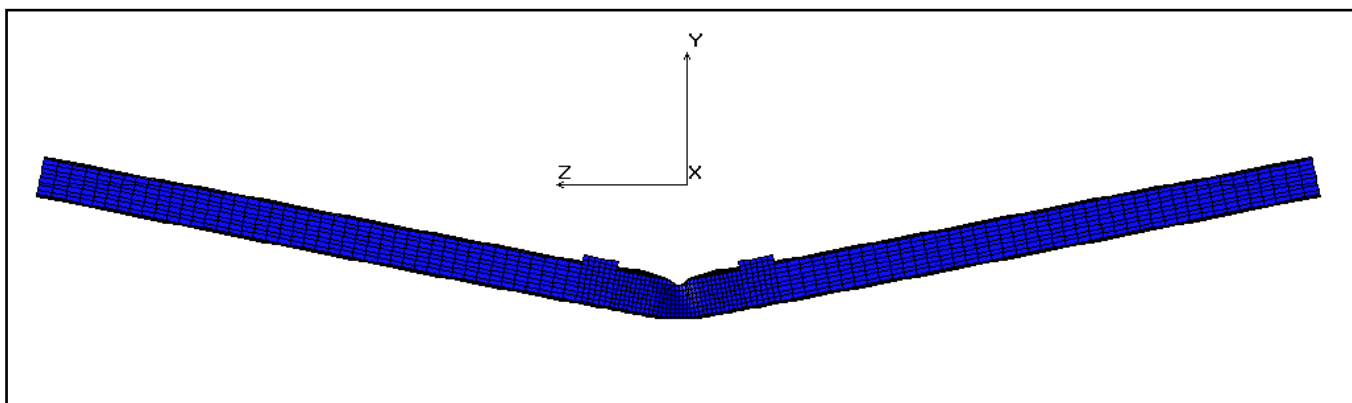
#### 7.4.8 Analisi non lineare

Per permettere al programma un'analisi non lineare in controllo di spostamento è stata assegnata una curva "time-parameter" la quale lega l'andamento dello spostamento che deve subire un punto prefissato del modello lungo una direzione scelta, al tempo. In questo

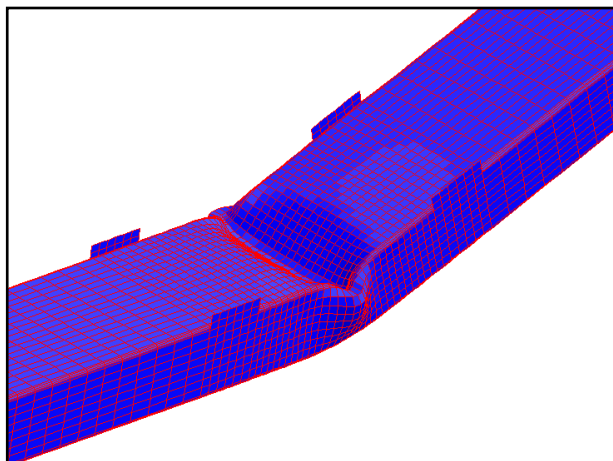
caso come nodo di riferimento ne è stato preso uno appartenente alla flangia laterale e come termine della prova è stato impostato uno spostamento massimo pari a 200mm.

#### 7.4.9 Risultati

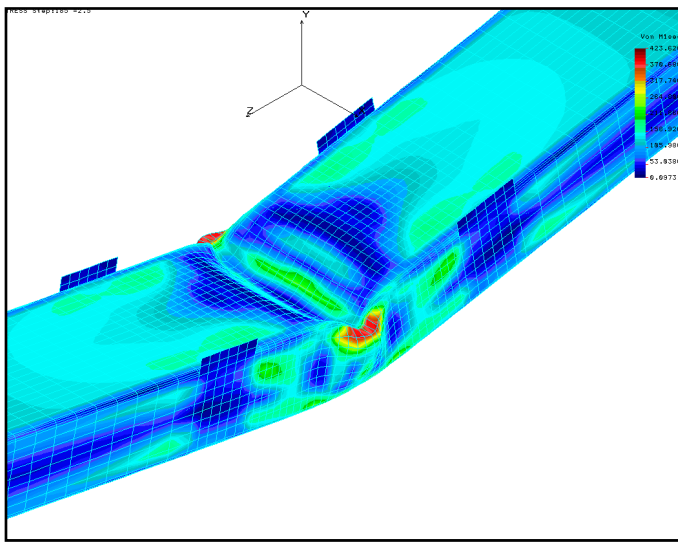
Come primo risultato riportiamo tre immagini estratte dai risultati forniti dal programma una volta terminata l'analisi plastica. La prima, fig. 7.11, rappresenta la deformata totale del profilo, la seconda, fig. 7.12, un particolare della zona centrale, in cui è chiaramente visibile la formazione di una bozza ed infine la terza immagine, fig. 7.13, mostra la distribuzione delle tensioni nella mezzeria del profilo.



**Fig.7.11** Deformata totale



**Fig.7.12** Particolare  
mezzeria

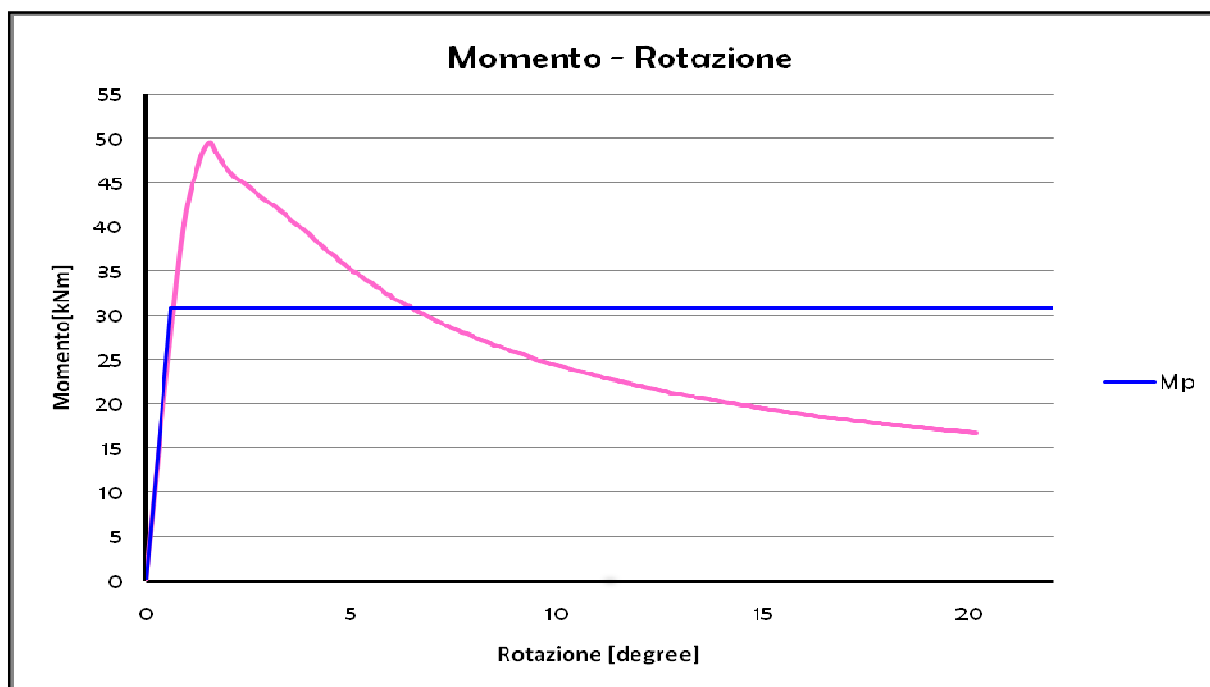


della deformazione



**Fig.7.13** Distribuzione delle tensioni in mezzeria

Infine, dall'analisi dei dati forniti dal programma, è stato ricavato il diagramma Momento– Rotazione, fig. 7.14



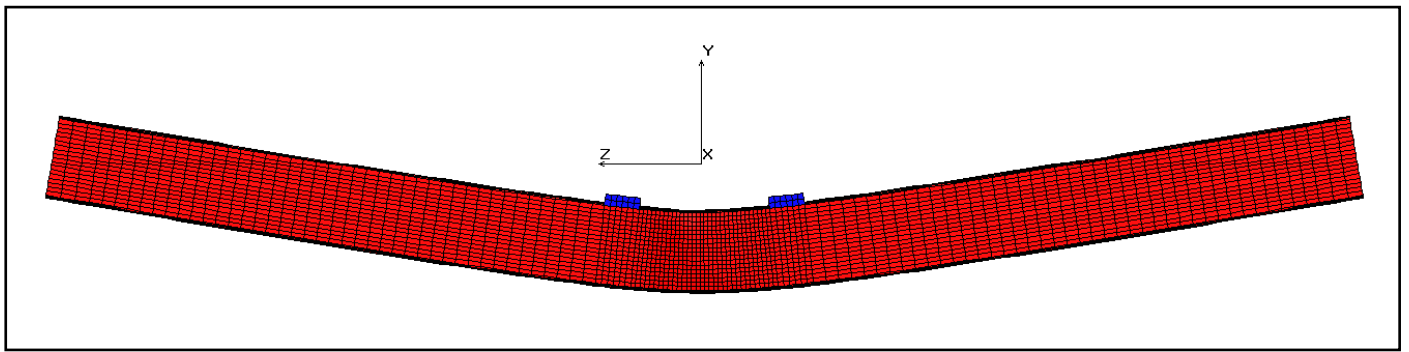
**Fig.7.14** Diagramma Momento - Rotazione

<b>Mmax [kNm]</b>	<b>Mp [kNm]</b>	<b>R</b>	<b>Classe</b>	<b>Modalità di crisi</b>
33,00	30,82	4,13	1	Singola bozza

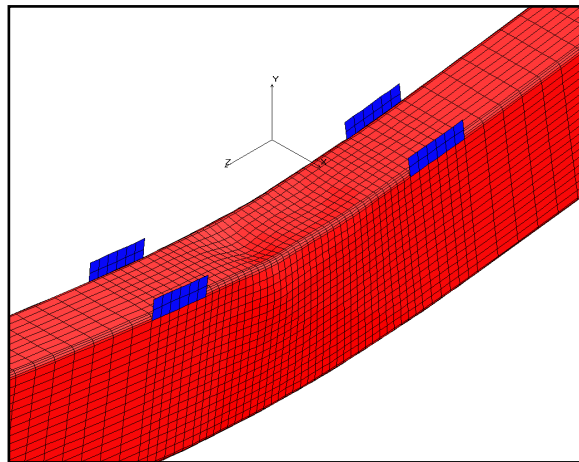
Il percorso descritto per il profilo RHS di dimensione 200x100x5 è stato eseguito per altri otto profili. Nelle pagine successive sono stati riportati, per ogni profilo, le caratteristiche del tubo, le deformazioni, l'andamento delle tensioni, il diagramma momento curvatura ed

una tabella riassuntiva contenente il momento massimo, il momento plastico, la capacità rotazionale, la Classe e la modalità di crisi relative al profilato in esaminato.

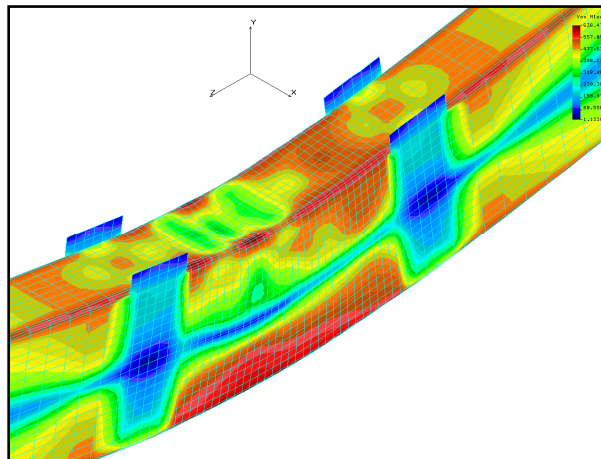
PROFILO 2			
H x B [mm]	Spessore [mm]	Posizione	Tipo di acciaio
200 x 100	6	FV	S355



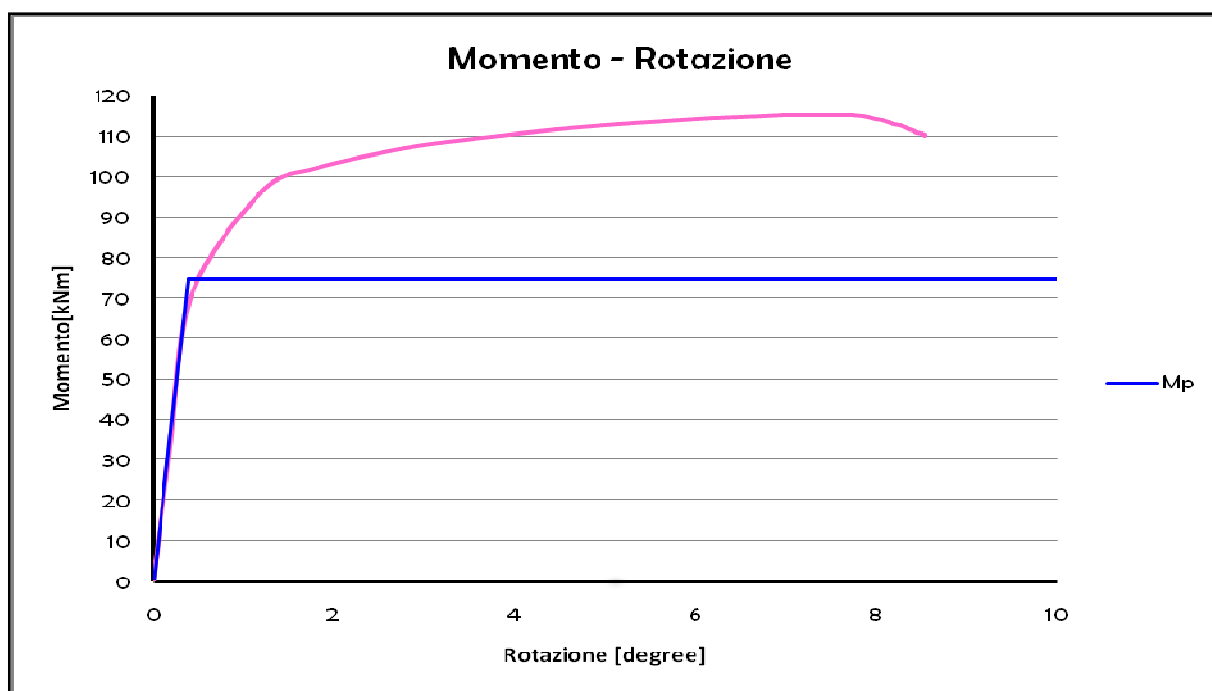
Deformata totale



Particolare della deformazione in mezzeria

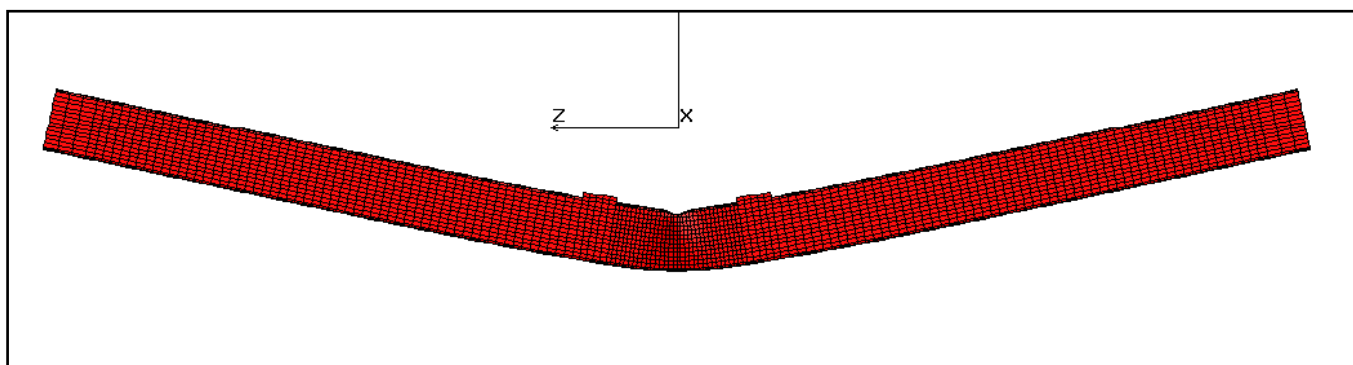


Andamento delle tensioni in mezzeria

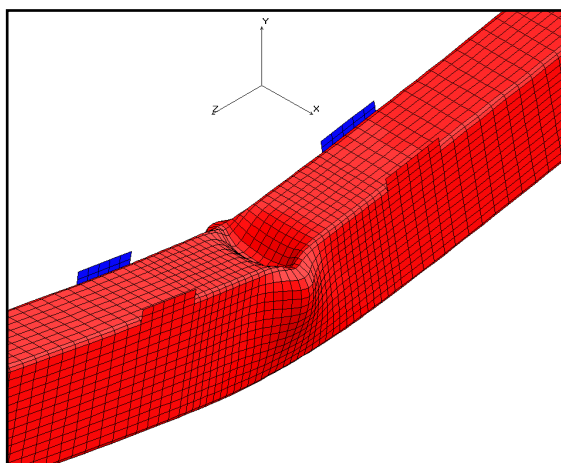


<b>Mmax [kNm]</b>	<b>Mp [kNm]</b>	<b>R</b>	<b>Classe</b>	<b>Modalità di crisi</b>
76,81	74,61	>20	1	Singola bozza

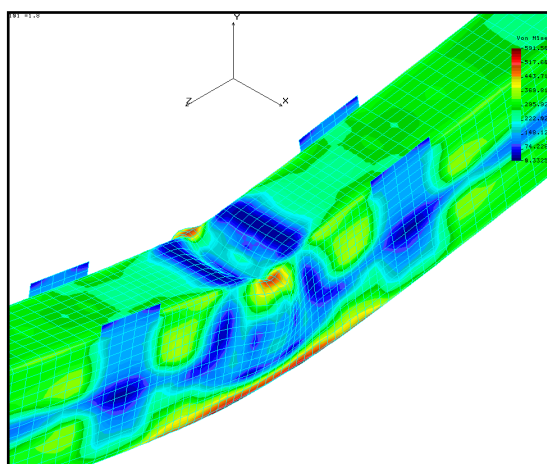
PROFILO 3			
H x B [mm]	Spessore [mm]	Posizione	Tipo di acciaio
150 x 100	5	FV	S355



Deformata totale



Particolare della deformazione in mezzeria



Andamento delle tensioni in mezzeria

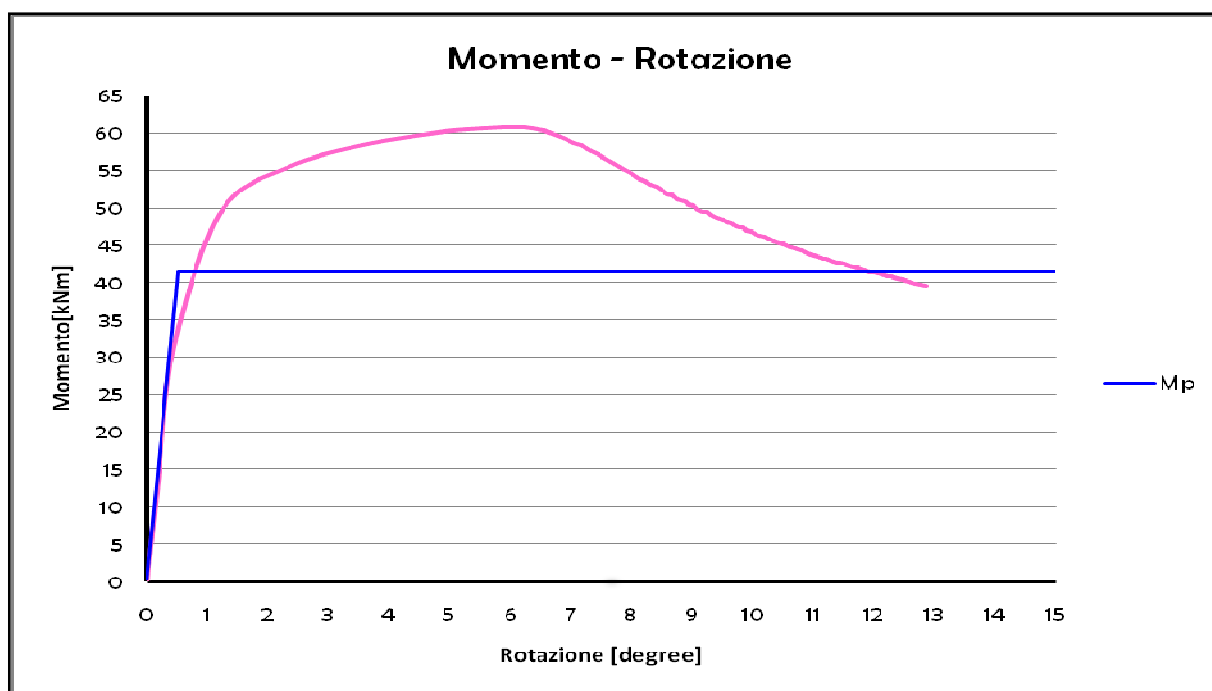
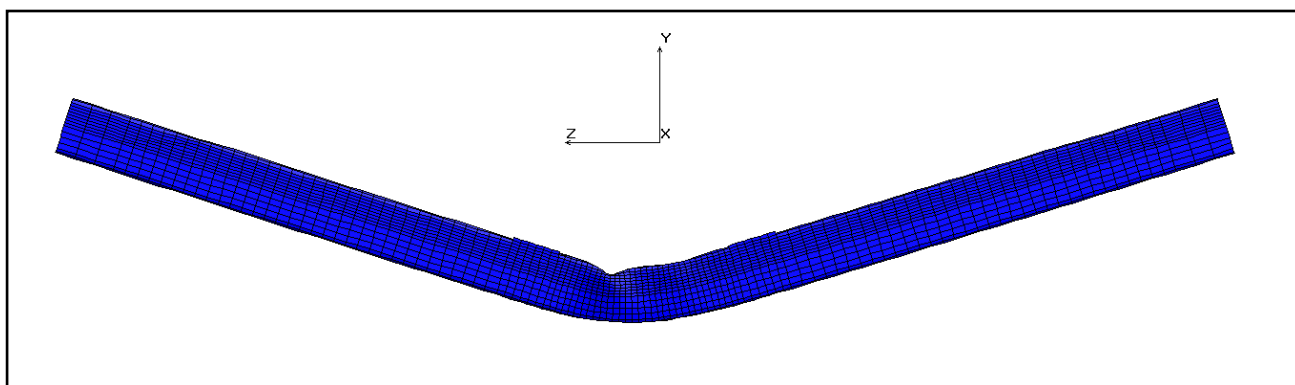


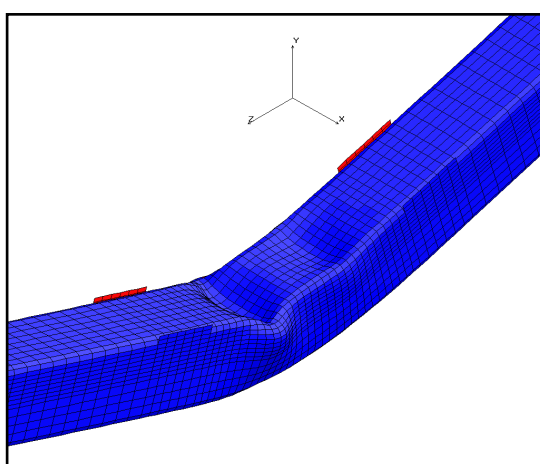
Diagramma Momento - Rotazione

<b>Mmax [kNm]</b>	<b>Mp [kNm]</b>	<b>R</b>	<b>Classe</b>	<b>Modalità di crisi</b>
48,55	41,44	14	1	Singola bozza

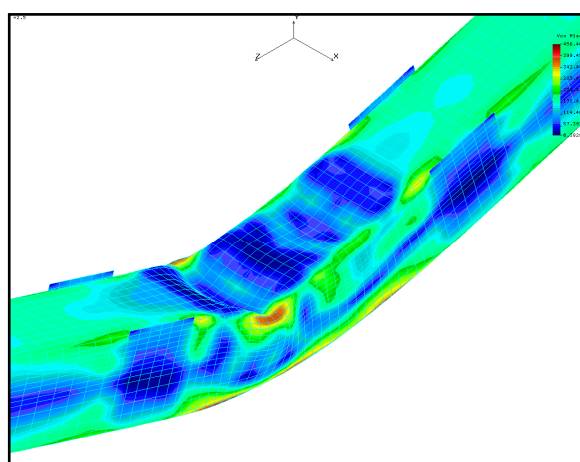
PROFILO 4			
H x B [mm]	Spessore [mm]	Posizione	Tipo di acciaio
100 x 100	5	/	S235



Deformata totale



Particolare della deformazione in mezzzeria



Andamento delle tensioni in mezzzeria

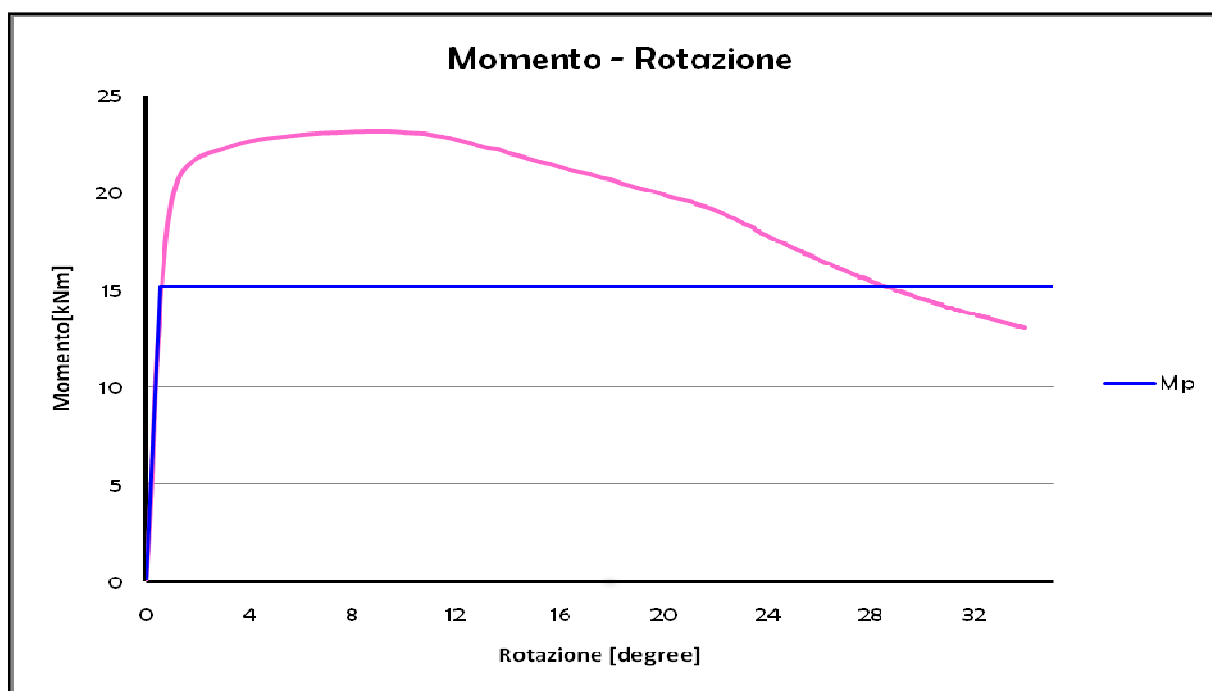
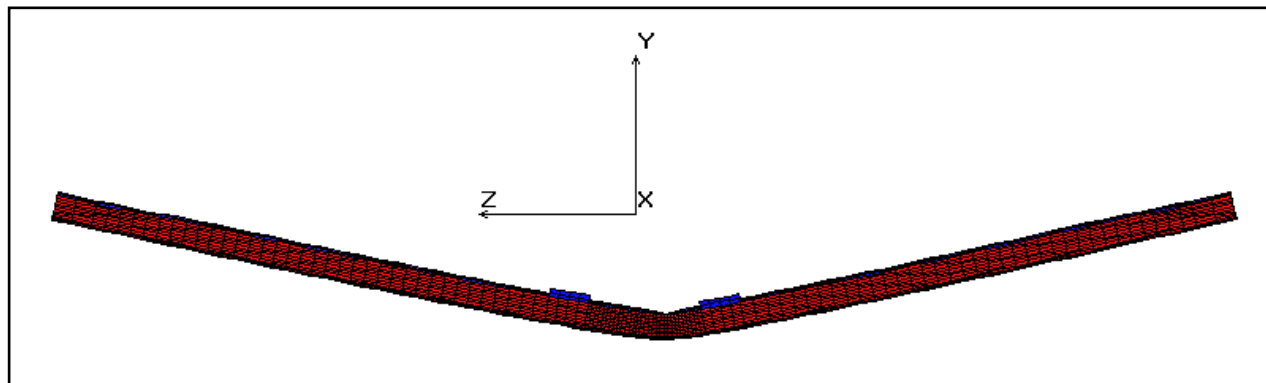


Diagramma Momento - Rotazione

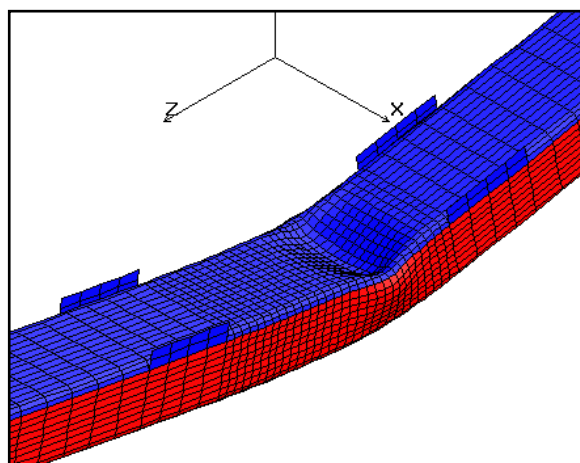
Mmax [kNm]	Mp [kNm]	R	Classe	Modalità di crisi
26,44	15,18	>20	1	Doppia bozza



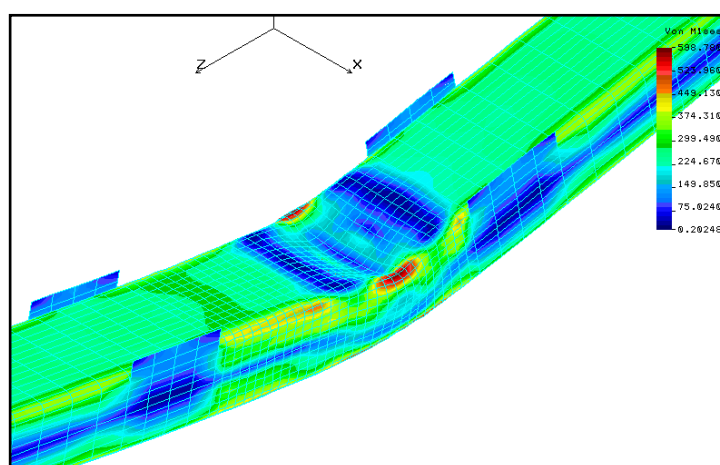
PROFILO 5			
H x B [mm]	Spessore [mm]	Posizione	Tipo di acciaio
120 x 80	5	F	S355



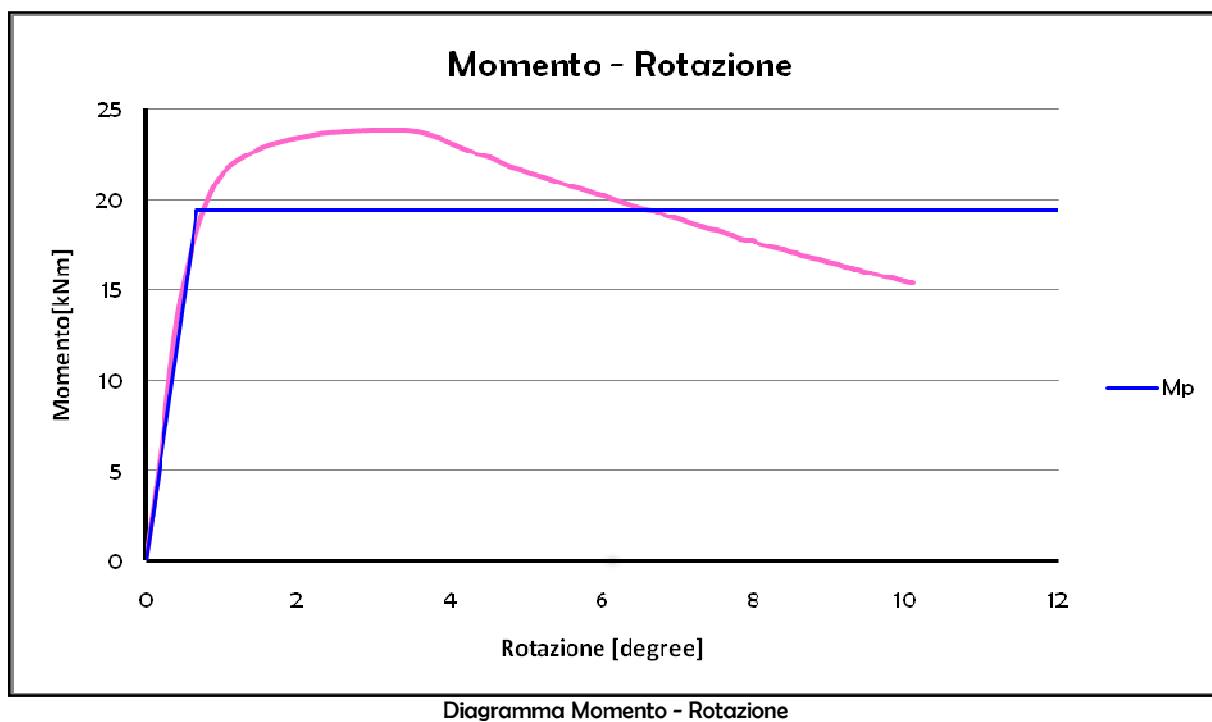
Deformata totale



Particolare della deformazione in mezzeria

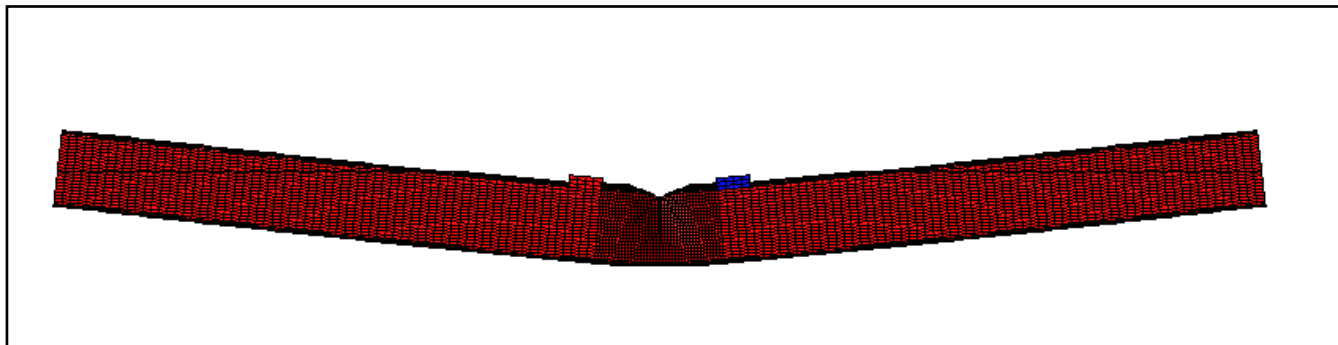


Andamento delle tensioni in mezzeria

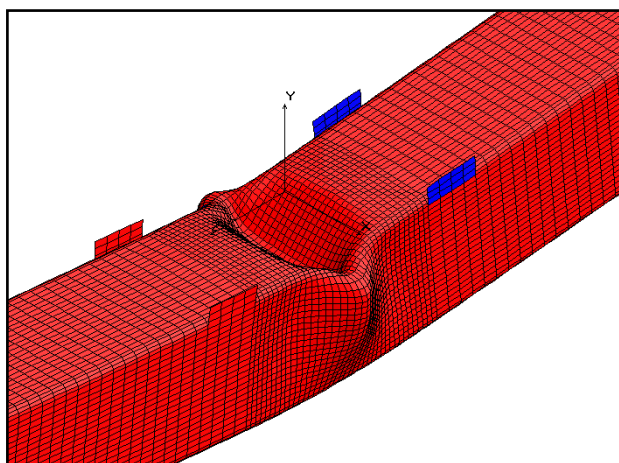


<b>Mmax [kNm]</b>	<b>Mp [kNm]</b>	<b>R</b>	<b>Classe</b>	<b>Modalità di crisi</b>
23,78	19,43	7,2	1	Singola bozza

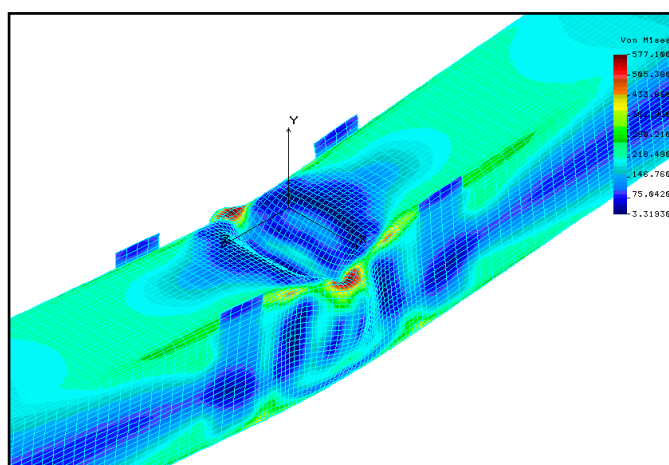
PROFILO 6			
H x B [mm]	Spessore [mm]	Posizione	Tipo di acciaio
200 x 200	5	/	S355



Deformata totale



Particolare della deformazione in mezzeria



Andamento delle tensioni in mezzeria

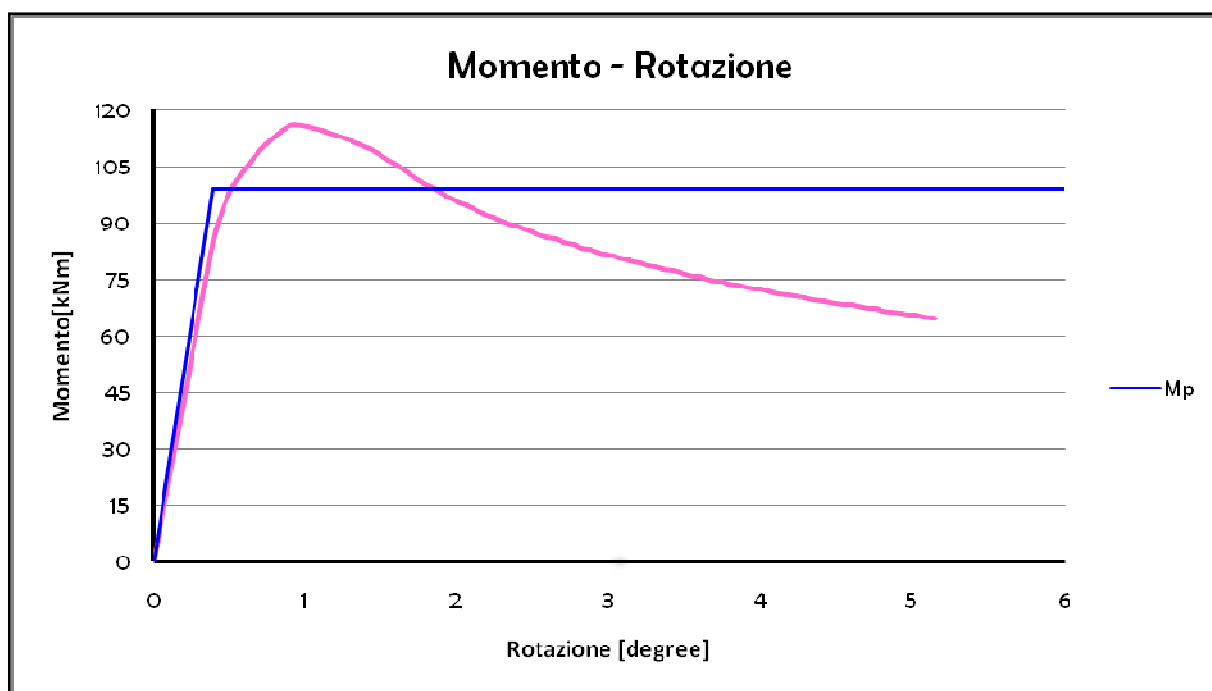
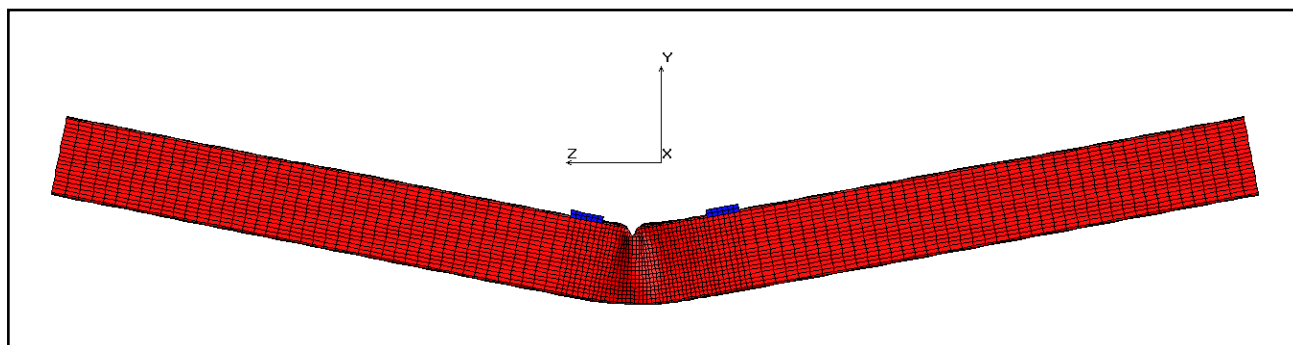


Diagramma Momento - Rotazione

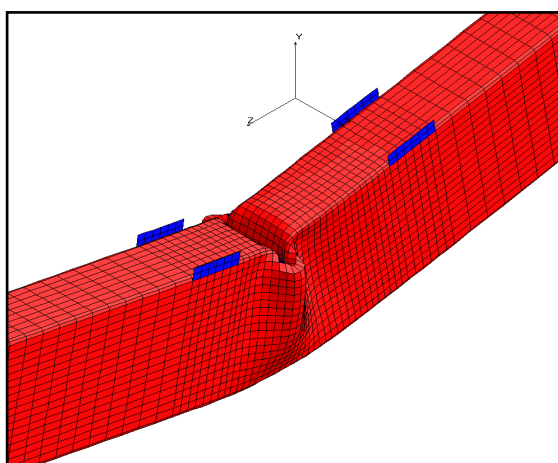
<b>Mmax [kNm]</b>	<b>Mp [kNm]</b>	<b>R</b>	<b>Classe</b>	<b>Modalità di crisi</b>
115,97	99,00	2,6	2	Singola bozza

**PROFILO 7**

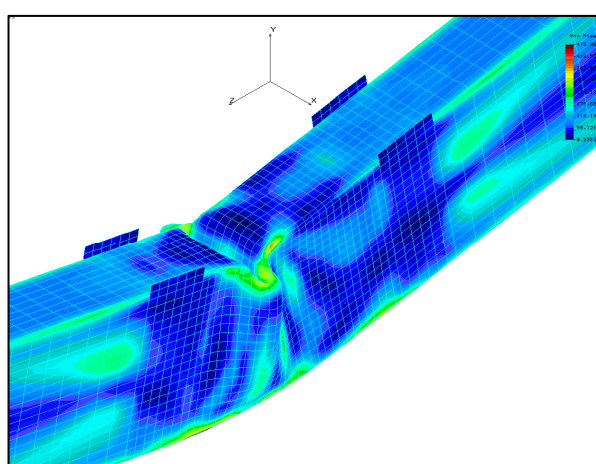
<b>H x B [mm]</b>	<b>Spessore [mm]</b>	<b>Posizione</b>	<b>Tipo di acciaio</b>
200 x 100	4	FV	S275



Deformata totale



Particolare della deformazione in mezzeria



Andamento delle tensioni in mezzeria

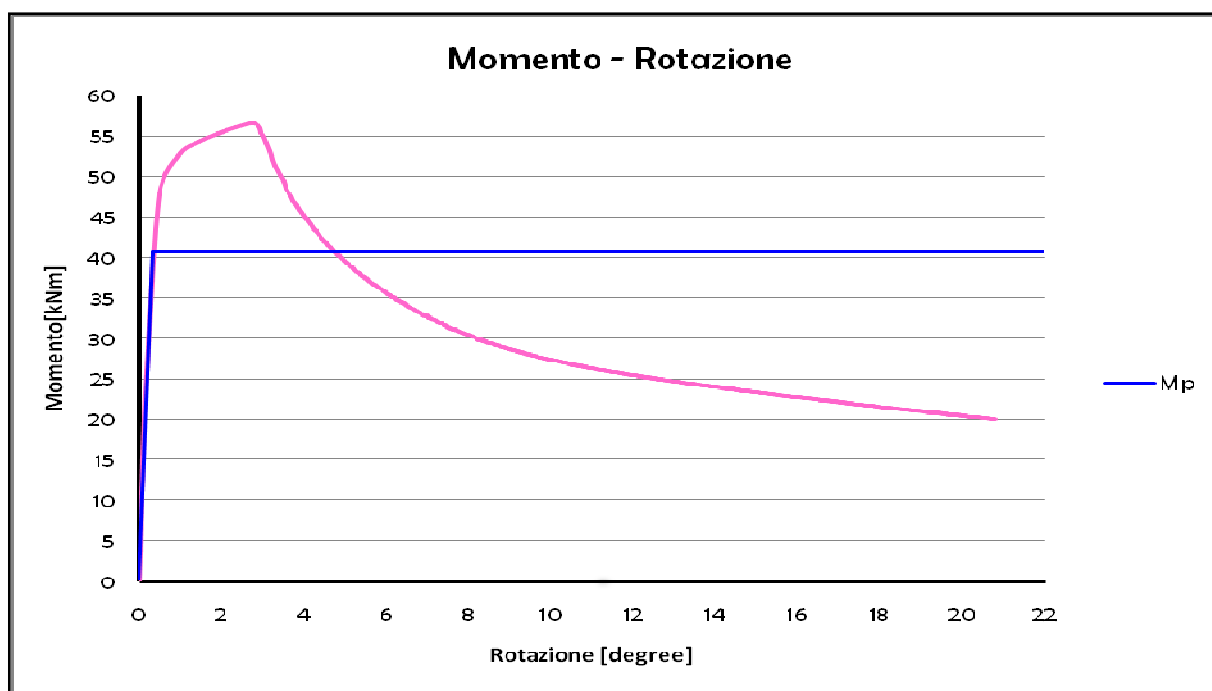
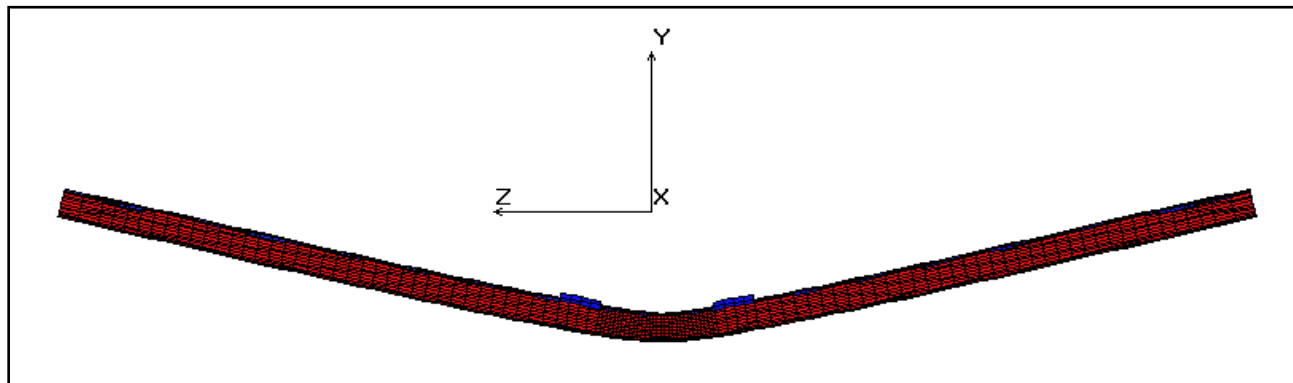


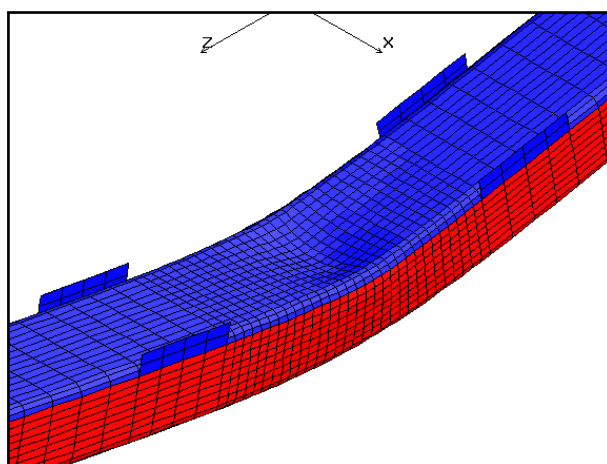
Diagramma Momento - Rotazione

Mmax [kNm]	Mp [kNm]	R	Classe	Modalità di crisi
37,68	40,71	11,3	1	Singola bozza

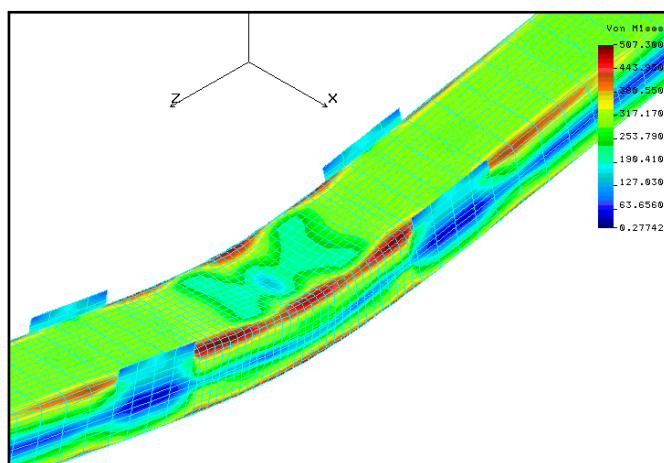
PROFILO 8			
H x B [mm]	Spessore [mm]	Posizione	Tipo di acciaio
120 x 80	6	F	S275



Deformata totale



Particolare della deformazione in mezzeria



Andamento delle tensioni in mezzeria

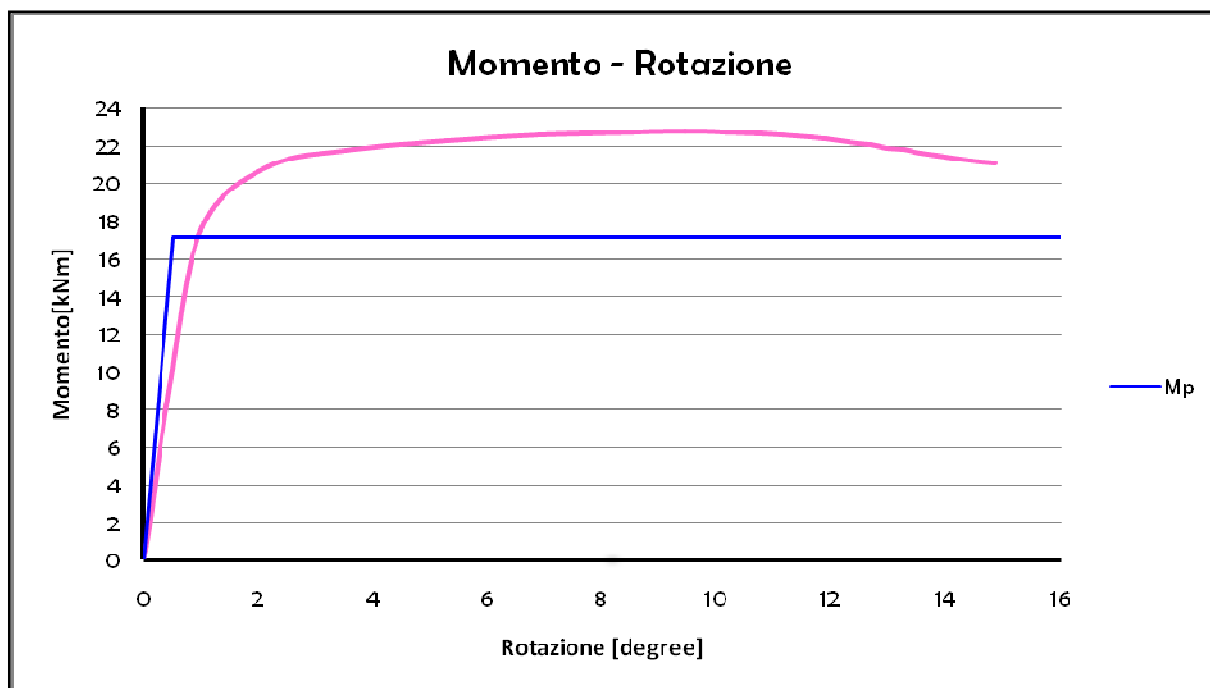


Diagramma Momento - Rotazione

<b>Mmax [kNm]</b>	<b>Mp [kNm]</b>	<b>R</b>	<b>Classe</b>	<b>Modalità di crisi</b>
22,74	17,13	>20	1	Singola bozza



## **8- CONCLUSIONI**

Nella presente Tesi è stato condotto uno studio teorico sperimentale sul comportamento plastico dei profilati cavi a sezione rettangolare formati a freddo, al fine di verificarne l'adeguatezza nella progettazione in campo plastico.

Nella prima parte, si è studiata l'evoluzione della progettazione in campo plastico. Da tale indagine è emerso che gli attuali limiti di snellezza altro non sono che una semplice estensione dei valori ottenuti nelle ricerche sui profili ad I. Per tale motivo le Norme attuali non tengono conto dell'iterazione tra la snellezza dell'anima e quella della flangia, nonostante che questa sia stata appurata da diversi ricercatori.

Nella seconda parte, è stato esaminato il comportamento sperimentale di 30 profili, ultimando così una ricerca in corso presso il Dipartimento di Ingegneria Strutturale dell'Università a Pisa. Tali elementi differiscono per dimensioni e rapporto tra le dimensioni della sezione trasversale, tipo di lavorazione, tipo di acciaio e resilienza, così da ampliare in modo significativo il campo di indagine.

Infine, nell'ultima parte sono state eseguite, parallelamente alle indagini di cui sopra, alcune modellazioni agli elementi finiti al fine di integrare ed estendere i risultati sperimentali.

Le conclusioni alle quali si è potuti giungere possono essere così riassunte:

- Per quanto riguarda la forma dei diagrammi Momento – Rotazione, tra i profili formati a caldo e quelli a freddo non sono emerse differenze significative; per quanto riguarda i carichi ultimi, invece, nel caso di profili CFRHS, a causa del processo di lavorazione, questi sono sensibilmente più alti di quelli nominali.
- Quando si esegue una progettazione in campo plastico, al fine di effettuare una valutazione più realistica della capacità portante della struttura, è consigliabile che il progettista disponga di una corretta conoscenza del comportamento post elastico del materiale.
- La classificazione di Hancock e Wilkinson, la quale considera la dipendenza del comportamento post elastico dei profilati cavi dalle snellezze di flangia e anima, è da considerarsi eccessivamente cautelativa.

- La Classificazione secondo l'Eurocodice 3 presenta delle lacune nel caso di profili RHS aventi rapporti tra altezza e larghezza maggiori di 1.
- Considerando una snellezza complessiva del profilo, espressa dalla formula,  $\lambda_s = \sqrt{\lambda_f^2 + \lambda_w^2}$  l'espressione  $R = [20,7300\lambda_s^{-1,95}]$ , fornisce una stima soddisfacente della capacità di rotazione dei profili RHS.
- Al fine della classificazione dei profili si può considerare che il dominio di Classe 1 sia rappresentato dall'espressione  $\lambda_f(\lambda_f + \lambda_w) \leq 2212$

## **BIBLIOGRAFIA**

- Ballio, G., Mazzolani, F.M.: “Strutture in acciaio”, *Hoepli Editore, Milano, (1996)*.
- Linchevsky, B., Sobolevsky, A., Kalmenev, A.: “Iron & Steel Making”, *MIR Publishers, Moscow, (1980)*.
- Marchese, B.: “Tecnologia dei materiali e chimica applicata”, *Liguori Editore, Napoli, (1990)*.
- Rondal, J., (1987), “Residual stresses in cold-rolled profiles”, *Construction & Building materials Vol.1 N.3*.
- Weng, C., T. Peköz, (1998), “Residual Stresses in Cold-Formed Steel Members”, *Journal of Structural Engineering, Vol.116, No.6 (1990), 1611-1625*.
- Case, (1992a), “Test on rectangular hollow section to investigate the effect of Variation of Yield Stress Around a section”, *Investigation report 5885 Centre of Advanced Structural Engineering*.
- Taccola, R.: “Comportamento a rottura di giunti a X saldati di profilati tubolari soggetti a flessione”, *Tesi di Laurea, Pisa (2004)*.
- Pipino A., “Influenza delle caratteristiche meccaniche del materiale sulla capacità di rotazione di sezioni tubolari metalliche”, *Tesi di Laurea, Pisa (2005)*.
- Diaco, C.: “Studio Teorico del Comportamento Elasto-Plastico di Strutture Tubolari realizzate con aste a Sezione Rettangolare, Formate a Freddo” , *Tesi di Laurea, Pisa, (2001)*.
- Eurocodice 3: “Progettazione delle strutture di acciaio, parte 1-1: Regole generali - Regole generali e regole per gli edifici”, (1998).
- Kuhlmann, U., (1989), “Definition of Flange Slenderness Limits on The Basis of Rotation Capacity Values”, *Journal of constructional Steel Research, Elsevier, No14, 21-40*.
- Wilkinson, T., Hancock, G.J., (1998), “Tests To Examine Compact Web Slenderness of Cold-Formed RHS”, *Journal of Structural Engineering, Vol. 124, No.10, October 1998, 1166-1174*.
- Sarti P., “Duttilità e capacità di rotazione di profili tubolari” , *Tesi di Laurea, Pisa (2005)*.
- Croce P., Buratti G., Taccola R., Sarti P., Pipino A., “Duttilità e capacità di rotazione di profilati tubolari a sezione rettangolare sagomati a freddo”, *Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Pisa*.

- Pellegrini M., “L’impiego dei profili tubolari in acciaio nell’edilizia”, *Tesi di Laurea Triennale, Pisa (2006)*.
- Zingarelli S., “Definizione della capacità di rotazione di profili cavi sagomanti a freddo”, *Tesi di Laurea, Pisa (2007)*.
- Hancock, G.J., Wilkinson, T., Zhao, X.L., (2000), “Research Into The Behaviour And Design of Cold-Formed Tubular Members and Connection”, *Lecture series, organized by the Australian Institute of Steel Construction, 32*.
- Hasan, S., Hancock, G.J., (1998), “Plastic Bending Test of Cold-Formed Rectangular Hollow Sections”, *Research Report, No R586 (Also in “Steel construction, Journal of the Australian Institute of Steel Construction, Vol.23, No.4, 1989, pp.2-19) 27, 32*.
- Sedlacek, G., Dahl, W., Stranghöner, N., Kalinovski, B., (1994), “Investigation Of The Rotation Behaviour Of Hollow Section Beams”, *Final Report, European Commission*.
- Stranghöner, N., (1994), “Rotation Requirement and Rotation Capacity of Rectangular, Square and Circle Hollow Sections”.
- Wilkinson, T., (1999), “The Plastic Behaviour of Cold-Formed Rectangular Hollow Sections”, *Thesis, Presented for the Degree of Doctor of Philosophy*.
- Wilkinson, T., Hancock, G.J., (1997), “Plastic Design of Cold-Formed RHS”, *CIDECT PROJECT 2S-4-97 INTERIM REPORT No.3, 106*.
- Wilkinson, T., Hancock, G.J., (1998), “Compact or Class 1 Limits for Rectangular Hollow Sections in Bending”, *Tubular Structures VIII, Proceedings, (the International Symposium of T.S., Singapore, Balkema publ., 409-416*.
- Wilkinson, T., Hancock, G.J., (1998), “Plastic Design of Cold-Formed RHS”, *Cidect Project 2s-2-98 Draft Final Report, 161*.
- Wilkinson, T., Hancock, G.J., (1998), “Tests To Examine Compact Web Slenderness of Cold-Formed RHS”, *Journal of Structural Engineering, Vol. 124, No.10, October 1998, 1166-1174*.
- Zhao, X.L., (1995), “Longitudinal Fillet Welds in Thin Cold-Formed RHS Members”, *Journal of Structural Engineering, vol. 121, No. 11, November 1995, 1683-1690*.
- Zhao, X.L., (1998), “Longitudinal Fillet Welds in Thin-Walled C450 RHS Members”, *ASCE, Journal of Structural Engineering, vol. 125, No. 8, August, 1999*.